Industriële productie

Het voortbrengen van mechanische producten

H.J.J. KALS CS. BUITING-CSIKÓS W. DEWULF B. LAUWERS
J.M. PONSEN A.H. STREPPEL T.H.J. VANEKER

\+ ONLINE OPGAVEN, VIDEO'S EN MEER



Boom

Zesde, herziene druk

Industriële productie geeft een grondige en brede inleiding op het multidisciplinaire vakgebied van de productietechniek, dat zich bezighoudt met het voortbrengen van mechanische producten. Het boek behandelt vormgevings- en bewerkingsprocessen, maar ook onderwerpen als materiaalgedrag, fabricage, assemblage en productiemachines. Daarnaast is er aandacht voor kwaliteit, kosten, de belangrijkste aspecten van product- en productieontwikkeling (waaronder productiegericht ontwerpen) én voor de technische en organisatorische bedrijfsvoering.

Deze zesde druk is geheel herzien, geactualiseerd en voorzien van een nieuwe opzet en indeling. Zo is er meer aandacht voor kunststoffen, niet-mechanische bewerkingen en is er een geheel nieuw hoofdstuk toegevoegd over materiaalaangroeitechnieken, waarin onder meer 3D-printen wordt behandeld. Daarnaast kunnen zowel studenten als docenten extra studiemateriaal vinden op de website bij dit boek (www.industrieleproductie.nl) zoals extra opgaven en video's.

Industriële productie is al jaren een standaardwerk voor studenten werktuigbouwkunde, vliegtuigbouwkunde, industrieel ontwerpen, (technische) bedrijfskunde en verwante studies in het technisch-wetenschappelijk en het hoger beroepsonderwijs.

Industriële productie is samengesteld door een redactiecommissie bestaande uit de auteurs prof. dr. ir. H.J.J. Kals, ir. Cs. Buiting-Csikós, prof. dr. ir. W. Dewulf, prof. dr. ir. B. Lauwers, ir. J.M. Ponsen, ir. A.H. Streppel en dr. ir. T.H.J. Vaneker.

www.boomhogeronderwijs.nl
www.industrieleproductie.nl

9 789024 408245

Industriële productie

Industriële productie

Het voortbrengen van mechanische producten

6e herziene druk

Prof. dr. ir. H.J.J. Kals
Ir. Cs. Buiting-Csikós
Prof. dr. ir. W. Dewulf
Prof. dr. ir. B. Lauwers
Ir. J.M. Ponsen
Ir. A.H. Streppel
Dr. ir. T.H.J. Vaneker

Boom

inclusief website!

Met behulp van onderstaande unieke activeringscode kun je een studentaccount aanmaken op www.industrieleproductie.nl, voor toegang tot extra materiaal bij dit boek. Deze code is persoonsgebonden en gekoppeld aan de zesde herziene druk. Na activering heb je vier jaar toegang tot de website. De code kan tot zes maanden na het verschijnen van een volgende druk worden geactiveerd. Heeft u dit boek tweedehands gekocht? In dat geval werkt mogelijk de code voor de bijbehorende website niet meer. De code kan namelijk al gebruikt zijn door de vorige eigenaar, en kan maar één keer toegepast worden.

Meer informatie over deze en andere uitgaven vindt u op www.boomhogeronderwijs.nl.

1e druk 1996
2e druk 1998
3e herziene druk 2003
4e herziene druk 2007
5e herziene druk 2012
6e herziene druk 2018
2e oplage 2019

Vormgeving en opmaak: Studio Bassa, Culemborg

ISBN: 9789024408245 (paperback)
ISBN: 9789024408252 (e-book)
NUR: 173/950

Voorwoord

Voor je ligt de zesde herziene uitgave van het studieboek *Industriële productie*. De redactiecommissie die dit boek heeft samengesteld, bestaat uit de auteurs prof. dr. ir. H.J.J. Kals, mevr. ir. Cs. Buiting-Csikós, prof. dr. ir. W. Dewulf, prof. dr. ir. B. Lauwers, ir. J.M. Ponsen, ir. A.H. Streppel en dr. ir. T.H.J. Vaneker.
Diverse auteurs hebben aan de totstandkoming van het boek en aan alle voorgaande uitgaven een wezenlijke bijdrage geleverd. We noemen hier met name ir. C.A. van Luttervelt en ir. K.A. Moulijn. Dr.ir D. Lutters verhelderde de relatie tussen product- en productieontwikkeling.
In deze zesde uitgave hebben prof. dr. ir. B. Lauwers, prof. dr. ir. W. Dewulf en dr. ir. T.H.J. Vaneker belangrijke bijdragen geleverd aan de uitbreiding en behandeling van moderne fabricagetechnieken, met de nadruk op niet-mechanische bewerkingen.
Aan de eerste uitgaven van dit boek hebben dr. ir. J.P. Baartman, dr. ir. J.H. Dautzenberg, ing. F. Langereis, ir. Th. Luijendijk en dr. ir. M. Tichem als auteur bijgedragen. Verder bedanken wij graag prof. dr. ing. habil. B. Karpuschewski, prof.dr.ir. R. Akkerman en ir. P.J.M. Wentzel voor hun adviezen en bijdragen.

De totstandkoming van dit boek vindt zijn oorsprong in het streven de kwaliteit en de doelmatigheid van het hoger onderwijs in de productietechniek te verbeteren. Een belangrijke doelstelling van het boek is bijdragen aan een betere beeldvorming en herkenbaarheid van het brede vakgebied van de productietechniek. In deze zesde uitgave hebben we opnieuw aandacht besteed aan nieuwe technieken, wat tevens heeft geleid tot aanpassing van de opzet en de indeling van het boek. Vorige uitgaven worden sinds vele jaren gebruikt door docenten van universiteiten en hogescholen voor het onderwijs in de studierichtingen werktuigbouwkunde, lucht- en ruimtevaarttechniek, industrieel ontwerpen en technische bedrijfskunde.

Bij het samenstellen van de inhoud hebben de volgende overwegingen een belangrijke rol gespeeld:
- Het aanbieden van kennis op gepast niveau aan studenten van technische universiteiten en hogescholen die geen voorkennis van het vakgebied bezitten.
- Het bieden van een context waarin het belang van de productietechniek binnen de disciplines die zich bezighouden met het ontwerpen en voortbrengen van producten tot uitdrukking komt.
- Het presenteren van kennis waarbij rekening wordt gehouden met behoeften van de industrie, en waarbij ruime aandacht besteed wordt aan keuzeproblemen en belangrijke aspecten op het gebied van de technische bedrijfsvoering.
- Het geven van een overzicht van het vakgebied productietechniek.

Het boek vormt een uitgebreide en degelijke inleiding op het omvangrijke vakgebied van het voortbrengen van mechanische producten: de productietechniek. Het behandelt fundamentele onderwerpen met betrekking tot materialen, materiaalbehandeling, fabricage, assemblage, productiemachines, kwaliteit en kosten. Daarnaast gaat het in op de belangrijkste aspecten van product- en productieontwikkeling, én van de technische en organisatorische bedrijfsvoering. Bij de samenstelling ervan hebben we veel aandacht besteed aan de onderlinge samenhang van de inhoud.

Alle aangeleverde teksten zijn door de redactie grondig getoetst en waar nodig aangepast en uitgebreid. Hetzelfde geldt voor het grote aantal figuren. De presentatie en de uitvoering van deze figuren is op uitstekende wijze verzorgd door ir. A.H. Streppel en ir. Cs. Buiting-Csikós. De verantwoordelijkheid voor de samenstelling en de inhoud ligt bij de redactiecommissie.

De redactie stelt het zeer op prijs kritieken en suggesties te ontvangen die kunnen leiden tot verbetering van toekomstige edities. Het redactieadres luidt:

Redactie Industriële Productie
p/a mevr. ir. Cs. Buiting-Csikós
TU Delft
Postbus 5
2600 AA Delft
e-mail: c.buiting-csikos@tudelft.nl

Prof. dr. ir. H.J.J. Kals

Enschede, januari 2018

Ten geleide

Bij de opzet van het boek hebben we rekening gehouden met de groeiende behoefte van de industrie aan pas afgestudeerde ingenieurs die problemen kunnen oplossen op het gebied van ontwerpen en produceren, maar die ook kennis bezitten van het integrale proces van het voortbrengen van producten.

Het boek beperkt zich tot de productietechnieken voor de vervaardiging van **discrete producten**. Dit zijn afzonderlijk te onderscheiden, aftelbare, al dan niet samengestelde producten met een (functioneel) herkenbare geometrie. Producten uit de chemische industrie (bijvoorbeeld benzine) of de voedingsindustrie (bijvoorbeeld suiker) blijven buiten beschouwing. Een ander kenmerk van discrete producten is dat ze verplaatsbaar zijn. Bouwwerken, van welke aard dan ook, vallen dus ook buiten het kader van dit boek.

Als gevolg van de handel en concurrentie op wereldschaal is het belang van de productietechniek als multidisciplinair vakgebied de afgelopen decennia flink toegenomen. Tegelijkertijd heeft de scherpe concurrentie geleid tot omvangrijke reorganisaties van vooral grote bedrijven. Men streeft hierbij naar schaalverkleining (businessunits), uitbesteding en 'platte' organisaties (*lean production*). Bij uitbesteding van de productie blijft het echter belangrijk dat productontwerpers een gedegen kennis hebben en behouden van de mogelijkheden van productietechnieken en de eisen die op basis daarvan aan het productontwerp moeten worden gesteld. Vooral kleinere bedrijven worden geconfronteerd met het toenemend belang van technologische kennis.
Een gevolg van deze ontwikkeling is dat de vraag naar ingenieurs in belangrijke mate verschoven is van de grote bedrijven (die vroeger het overgrote deel van de pas afgestudeerde ingenieurs aannamen) naar middelgrote en kleine bedrijven. De behoefte aan breedte in de opleiding is hierdoor toegenomen. Gelijktijdig zijn de mogelijkheden voor opleiding en training binnen bedrijven afgenomen. Daarmee kan de toenemende vraag worden verklaard naar pas afgestudeerde ingenieurs met voldoende operationele kennis van het vakgebied en een goed inzicht in de behoeften van de industrie. Productieactiviteiten worden steeds vaker verplaatst van traditionele industrielanden naar industrielanden in opkomst. Dit vermindert echter zeker niet de noodzaak van productietechnisch onderwijs in eerstgenoemde landen. Nieuwe producten, fabricagetechnologieën en productiemiddelen worden nog steeds overwegend in de traditionele industrielanden ontwikkeld. De noodzaak om toekomstige ontwerpers en bedrijfskundigen te onderwijzen in het vakgebied neemt slechts toe. Verder hebben deze ontwikkelingen in het afgelopen decennium zelfs geleid tot een toegenomen vraag naar hoger opgeleide werktuigbouwkundig ingenieurs – in België technisch ingenieurs genoemd.

Het boek is breed opgezet. Door het gehele boek heen hebben we getracht de behandelde processen, technieken en apparatuur terug te brengen tot de fundamentele basis. Gezien de aard en de enorme omvang van het vakgebied is het onmogelijk om in dit studieboek enige vorm van volledigheid te bereiken. Het vakgebied omvat een grote diversiteit aan mogelijke technieken, te bewerken materialen, en mogelijke apparatuur. De brede opzet omvat onder andere de behandeling van belangrijke fabricagetechnologieën, de veelvoorkomende processen voor materiaalbewerking, van assemblage met de veelvuldig daarbij toegepaste materialen en gereedschappen, én de daarmee samenhangende productietechnische aspecten, zoals kwaliteit, kosten en de organisatie van de productie. Kunststoffen vormen als materiaal geen hoofdgroep, maar komen wel aan de orde bij een aantal behandelde bewerkingstechnieken. Ook gaan we in op de samenhang tussen productontwerp- en productieontwikkeling en besteden we ruim aandacht aan de uitgebreide keuzeproblematiek in een productieomgeving.

Het boek is in de eerste plaats gericht op de studierichtingen werktuigbouwkunde, lucht- en ruimtevaarttechniek, industrieel ontwerpen, technische bedrijfskunde en verwante studierichtingen in het wetenschappelijk onderwijs en het hoger beroepsonderwijs. Daarnaast is het boek geschikt voor andere studierichtingen, zoals bedrijfsinformatietechnologie, waar een elementair inzicht in de uitvoering van bewerkings- en productieprocessen niet mag ontbreken.
Afhankelijk van de studie- of afstudeerrichting zal het nodig zijn om aansluitend op de hier aangeboden stof een of meer onderwerpen verder uit te werken. Voor studierichtingen zoals technische bedrijfskunde zal de diepgang van de hier aangebo-

den stof, wat de technische onderwerpen betreft, voldoende zijn. Het is overigens goed mogelijk bepaalde delen over te slaan, hetzij omdat ze van minder belang worden geacht, hetzij omdat ze op een ander moment in de studie uitvoeriger aan de orde komen.

Afgezien van het gebruik in het onderwijs ziet de redactie toepassingsmogelijkheden van het boek als naslagwerk voor ontwerpers, constructeurs en productie-ingenieurs die naast hun bedrijfsgebonden kennis en ervaring behoefte hebben aan een algemeen en gestructureerd overzicht van het vakgebied en de daarin toegepaste technologieën.

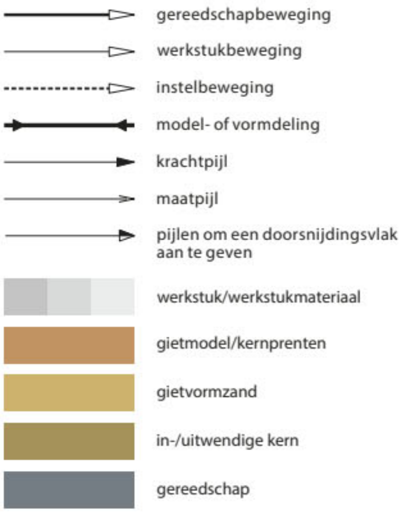
Het gebruik van dit boek

Het boek is geschikt voor zelfstudie. Daartoe is een aantal oefenvragen opgenomen. De vragen zijn vooral bedoeld om de inhoud, de samenhang en het belang van de behandelde stof beter te kunnen begrijpen. Gezien de grote diversiteit aan voorkomende producten, materialen, processen en doelstellingen, is het praktisch onmogelijk op enige selectieve wijze een groot aantal oefenvragen met voldoende diversiteit toe te voegen. Een deel van de gegeven vragen is erop gericht de student te stimuleren actief met de stof bezig te zijn en is minder geschikt als tentamenvraag. Het gegeven antwoord is in zo'n geval niet het enige juiste, maar meer een aanwijzing voor de juiste denkrichting. Andere vragen komen wel in aanmerking om te worden gebruikt als tentamenvragen. Docenten kunnen een waardevolle bijdrage aan het onderwijs leveren door eigen voorbeelden te kiezen en deze samen met de studenten uit te werken.

Het heeft slechts zin met het beantwoorden van de vragen te beginnen wanneer de stof grotendeels bekend is. Probeer eerst de antwoorden te formuleren zonder op de tekst in het boek terug te vallen. Wanneer dit bij herhaling niet lukt, beheers je de stof nog onvoldoende. Ga dan eerst verder met het bestuderen van de leerstof en probeer je alvast voor te stellen welke vragen je erover kunt verwachten. Probeer daarna opnieuw de vragen te beantwoorden. Na het beantwoorden kun je op de leerstof teruggrijpen om te kijken of je ze goed had. Gebruik pas op het laatst de antwoorden op www.industrieleproductie.nl om de kwaliteit van je eigen antwoorden te toetsen. Deze site bevat tevens een groot aantal aanvullende vragen. We raden je sterk aan om niet alleen de oefenvragen uit te werken, maar ook te oefenen met het maken van schetsen (een vaardigheid die iedere ingenieur moet beheersen).

Tegenwoordig is bij allerlei vormen van projectonderwijs vaak veel meer informatie over bepaalde onderwerpen nodig dan in dit boek aanwezig is. Om hierin te voorzien hebben we bij elk hoofdstuk zorgvuldig geselecteerde literatuurverwijzingen opgenomen. Verwijzingen naar specialistische literatuur hebben we met opzet achterwege gelaten. We bevelen onderwijsinstellingen aan de vermelde literatuur in hun bibliotheek op te nemen.

In de tekeningen komen verschillende typen pijlen voor en worden bepaalde onderdelen in kleur gekenmerkt, zie de figuur hieronder.



Vaktermen worden op de plaats waar ze worden geïntroduceerd vetgedrukt weergegeven. Een trefwoordenregister met al deze vaktermen vind je achter in het boek.

De redactie wenst je veel succes bij de bestudering van de inhoud van dit boek en hoopt dat de verworven kennis bij zal dragen tot een grotere interesse voor het vakgebied.

De redactie

Inhoud

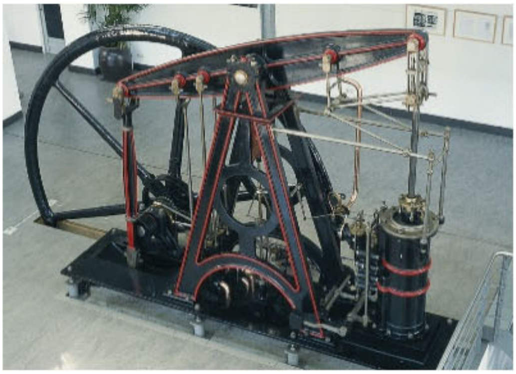
1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft de samenhang weer tussen de technieken voor het vervaardigen van producten en de verschillende disciplines in het productiebedrijf. Aan de hand hiervan maken we duidelijk waarom ook ontwerpers van producten kennis van en inzicht in het vakgebied productietechniek moeten bezitten.
Daarnaast vind je in dit hoofdstuk een overzicht van de belangrijkste aspecten van het produceren, en van de inhoud van de volgende hoofdstukken.

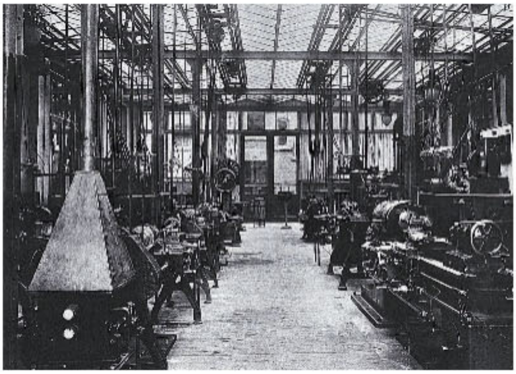
1.1 De ontwikkeling van de industriële productie

De industriële productietechniek ontstond tegen het eind van de achttiende eeuw. De meest voor de hand liggende illustratie hiervan is de stoommachine (zie figuur 1.1). Hiermee werd onder andere water uit kolenmijnen opgepompt. De opkomst van de stoommachine markeert het tijdstip waarop men in staat was om de principes van de natuurkunde, mechanica en productietechniek toe te passen voor het ontwerpen en fabriceren van bruikbare en rendabele werktuigen. Deze ontwikkeling wordt ook algemeen beschouwd als het begin van de opkomst van de mechanische industrie.

Een essentiële voorwaarde voor het bouwen van een stoommachine was de beschikbaarheid van kennis en middelen om cilinders en zuigers te vervaardigen, en om de vorm en afmetingen daarvan nauwkeurig te kunnen bepalen. Daarvoor had men gereedschapswerktuigen nodig, en voldoende energie om die aan te drijven.
De stoommachine leverde energie op een centraal punt. Op dat punt moest de energie ook worden afgenomen (zie figuur 1.2). Het beschikbaar komen van zeer grote hoeveelheden energie op één plaats luidde de eerste industriële revolutie in. Deze werd gekenmerkt door de opkomst van grote **industriële bedrijven**, die in de plaats kwamen van de kleine ambachtelijke bedrijfjes uit de tijd van de wind- en watermolens. Een van de belangrijkste kenmerken van de industrialisatie is het bijeenbrengen van productiemiddelen, zoals arbeid, machines en gereedschappen, in een georganiseerd verband. De industriële productiebedrijven hadden een veel grotere capaciteit dan ambachtelijke bedrijven. De opkomst van de spoorwegen en de stoomscheepvaart maakte het mogelijk om grondstoffen en materialen over grote afstanden aan te voeren en om producten over een groot afzetgebied te verspreiden. Dit stimuleerde vervolgens de machine-industrie en de bouw



Figuur 1.1 Balansstoommachine uit 1843 (Science Centre Delft)



Figuur 1.2 Centrale werkplaats van de Technische Hogeschool Delft omstreeks 1938.
De machines werden oorspronkelijk aangedreven door een stoommachine via aandrijfassen en riemschijven

van civiele werken zoals spoorlijnen, bruggen en waterwegen.
De ontwikkeling van industriële bedrijven bracht zeer grote sociale problemen met zich mee. De massale trek van de bevolking naar de industriesteden en de daaruit voortvloeiende huisvestingsproblemen, schrijnende armoede en onmenselijke arbeidsomstandigheden, zijn onverbrekelijk verbonden met de industriële revolutie. Vanaf het einde van de negentiende eeuw, zo'n 100 jaar na het begin van de industriële revolutie, kwam hierin heel geleidelijk verbetering door de ontwikkeling van de parlementaire democratie en van de vakbeweging.

Een van de eerste tekenen van massale onvrede onder de arbeiders was de opstand van de 'Luddieten' rond 1815. De Luddieten waren Engelse textielarbeiders die onder aanvoering van Ned Ludd de voor die tijd moderne weefgetouwen vernielden uit vrees dat die hen werkloos zouden maken.

Deze weefgetouwen zijn de voorlopers van de huidige productiemachines. Het te weven patroon kwam tot stand met behulp van een reeks ponskaarten (zie figuur 1.3). Het gatenpatroon in de kaarten bepaalde het weefpatroon. Oftewel: een gemakkelijk te verwisselen informatiedrager bevatte (gecodeerde) informatie over het product en de manier waarop dat moest worden gemaakt. Met behulp van deze informatie verliep het productieproces geheel of grotendeels automatisch. Ponskaarten of ponsbanden worden nu niet meer gebruikt, maar verder is deze omschrijving nog steeds van toepassing op de moderne numeriek bestuurde (computergestuurde) gereedschapswerktuigen! Numerieke besturing wordt meestal aangeduid met de Engelse afkorting NC (*numerical control*). Dit onderwerp wordt behandeld in hoofdstuk 13.

Overigens hebben de Luddieten moderne navolgers gekregen. Zo stelden Nederlandse politici in de zeventiger jaren van de twintigste eeuw voor een heffing in te voeren om de automatisering af te remmen en daardoor werkgelegenheid te behouden.

Andere problemen die ontstonden bij het produceren op grote schaal waren gebrek aan kapitaal en geschoolde werkkrachten, de spreiding van taken en de daarmee gepaard gaande specialisatie. Als gevolg van deze specialisatie ontstond een complexe organisatie en werd de communicatie tussen de



Figuur 1.3 Jacquard-weefgetouw, begin 19e eeuw. Het weefpatroon wordt door een ponsband gestuurd. (Museum Twentse Welle)

verschillende afdelingen van organisaties steeds moeilijker.
In het begin van de twintigste eeuw volgden nieuwe belangrijke ontwikkelingen: de opkomst van de elektrificatie, de auto, het vliegtuig, radio en televisie. Na de Tweede Wereldoorlog volgden de ruimtevaart, de micro-elektronica en de informatietechnologie. De technieken waren in principe al bekend, maar er waren steeds technische doorbraken nodig om deze ook praktisch toe te kunnen passen. Zo was er bijvoorbeeld geen vliegtuig mogelijk zonder een lichte verbrandingsmotor, en geen ruimtevaart zonder micro-elektronica.

De duidelijkste en belangrijkste trend van de afgelopen eeuw is echter de enorme toename van de nauwkeurigheid waarmee zeer uiteenlopende fabricagebewerkingen en materiaalbehandelingen kunnen worden uitgevoerd. Dit is gedurende de afgelopen decennia de drijvende kracht geweest achter een vorm van productvernieuwing die het beste aangeduid kan worden met **miniaturisatie**.
De **microtechnologie** draait om het vormgeven en fabriceren, evenals het manipuleren, plaatsen en meten van producten op sub-100-micrometerschaal.

De huidige ontwikkelingen op dit gebied en de daaraan gekoppelde productiemogelijkheden in de micro-elektronica komen voort uit de voortgaande behoefte tot miniaturisering. Deze ontwikkelingen richten zich voornamelijk op de precisiefabricage, waarmee steeds weer nieuwe producten technisch en economisch aantrekkelijk op de markt kunnen worden gebracht. Dit is bijvoorbeeld te zien in de automobielindustrie. Bij de duurdere typen auto's maakt de toegevoegde waarde van de micro-elektronica met de daarbij behorende sensoren en actuatoren al meer dan de helft van de toegevoegde waarde uit.
De nieuwste uitdaging is te vinden in de biotechnologie. Deze technologie richt zich vooralsnog vooral op nieuwe materialen en toont een grote betrokkenheid met de fysica en de chemie. De **nanotechnologie** draait om het vormgeven en fabriceren, evenals het manipuleren, plaatsen en meten van producten op sub-100-nanometerschaal, oftewel < 0,0001 mm. Vanuit mechanisch oogpunt kan deze technologie worden beschouwd als een logische voortzetting van de microtechnologie. Als het tot industriële productie komt, zal men in de toekomst voor de realisatie van nanoproducten dan ook veelvuldig een beroep moeten doen op de mechanische en micro-elektronische disciplines vanwege de vereiste productieapparatuur. Daarmee wordt tegelijkertijd duidelijk dat de maakbaarheid de grootste belemmering vormt voor productvernieuwing.

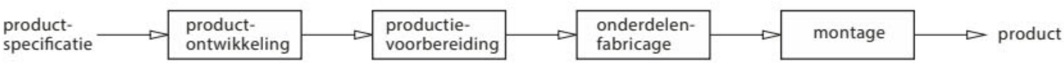
1.2 Organisatie en communicatie

In de vorige paragraaf schreven we al dat ambachtelijke bedrijfjes onder invloed van de industriële revolutie uitgroeiden tot industriële ondernemingen. De ambachtelijke bedrijfjes werden gevormd door een eigenaar, tevens productontwikkelaar, vakman en verkoper, en één of meer leerlingen die de eigenaar assisteerden. De industriële ondernemingen hadden daarentegen veel meer werknemers, ieder met hun eigen taak. Deze ondernemingen bleven groeien, de technische vooruitgang schreed voort en de producten en processen werden steeds ingewikkelder.

Dit leidde in de eerste helft van de twintigste eeuw tot een onderscheid tussen verschillende **bedrijfsfuncties** en zelfs tot onderscheid binnen deze bedrijfsfuncties. Dit zien we heel duidelijk terug in de ontwikkeling van de productiefunctie. Vooral bij massaproductie werden de opeenvolgende bewerkingen opgesplitst in eenvoudige, steeds terugkerende handelingen die elk door een werknemer werden uitgevoerd. Op deze wijze kon de productiviteit ver worden opgevoerd en het werk worden overgelaten aan ongeschoolde of beperkt geschoolde en laagbetaalde arbeiders. Charlie Chaplin laat in de film *Modern Times* (1936) op karikaturale wijze zien waar dit toe kan leiden!
Gelijksoortige taken werden bijeengebracht in afzonderlijke organisatorische eenheden binnen het bedrijf. Ook vandaag de dag hebben veel bedrijven verschillende afdelingen, zoals verkoop of marketing, productontwikkeling en -vervaardiging. De opdeling in verschillende bedrijfsfuncties is ook terug te vinden in de bouwwereld, waar de makelaar, de architect en de aannemer vaak onafhankelijk van elkaar opereren.

Naarmate de onderneming groeit, gaat de taakverdeling steeds verder. Figuur 1.4 geeft de vier primaire taken bij het voortbrengen van een product weer, die vaak als afzonderlijke bedrijfsfuncties worden afgehandeld. De bedrijfsfuncties moeten elkaar ondersteunen en daarvoor is **communicatie** nodig. Het is bij de functiegerichte structuur zeer moeilijk te vermijden dat communicatiestoornissen en scheidingsmuren tussen afdelingen ontstaan. Als de communicatie tussen de bedrijfsfuncties niet behoorlijk werkt, is het vrijwel onmogelijk om aan alle eisen te voldoen die aan het product worden gesteld (bijvoorbeeld op het gebied van kwaliteit, levertijd en kostprijs).

Communicatie vraagt in de eerste plaats om bereidheid om te overleggen met mensen uit andere vakgebieden. Dit blijkt vaak veel moeilijker dan je op het eerste gezicht misschien zou verwachten. Een commercieel ingesteld persoon denkt en redeneert vaak anders dan een ontwerper. Hij heeft zijn eigen jargon en zijn eigen prioriteiten. Hij verwacht onmiddellijk antwoord te krijgen op een vraag,



Figuur 1.4 Van productspecificatie tot product

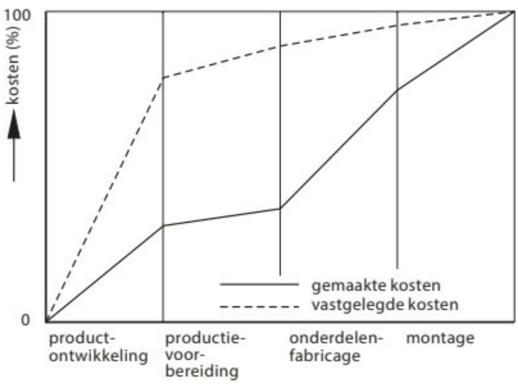


Figuur 1.5 Communicatie

terwijl de ontwerper daar misschien eerst nog een tijd mee aan de slag moet.

Ook ontwerpers en het personeel in de werkplaats moeten bereid zijn naar elkaar te luisteren, zich te verdiepen in elkaars problemen, en samen naar een oplossing te zoeken. Maar al te vaak worden productontwerpen doorgeschoven naar de werkplaats zonder dat de ontwerper zich voldoende heeft afgevraagd hoe het product gemaakt moet worden. Die zegt vaak al snel: 'Dat is mijn probleem niet!' (zie figuur 1.5).

Figuur 1.6 geeft het resultaat van verschillende onderzoeken weer, uitgevoerd in de industrie. Je ziet het aandeel in de productkosten van productontwikkeling, productievoorbereiding, onderdelenfabricage en montage. Daarnaast zie je op welke plaats deze kosten worden bepaald. Het aandeel van de ontwerpkosten is beperkt, maar de ontwerper legt voor een zeer groot deel de productiemethoden vast, en daarmee de kostprijs van het product. Als een ontwerp vanuit het oogpunt van kosten ongunstig is, kan dat nooit worden goedgemaakt door een efficiënte productiemethode.



Figuur 1.6 Schematisch verloop van de kosten

Goed overleg is dus van levensbelang voor het voortbestaan van de onderneming. Behalve de bereidheid om te communiceren is voor vruchtbaar overleg ook voldoende deskundigheid nodig. Daarnaast moet het betrokken personeel natuurlijk over de benodigde gegevens kunnen beschikken of toegang hebben tot de communicatiekanalen die deze gegevens kunnen leveren. De ontwerper zal een goede kennis van, en inzicht in, de productietechnieken moeten bezitten om zelfstandig goede voorstellen uit te kunnen werken.

Communicatiemiddelen

Hoe complexer de bedrijfsprocessen, hoe meer behoefte aan goede communicatie. Vanuit de mondelinge communicatie in het ambachtelijke bedrijf ontstonden verschillende communicatiemiddelen.

Vanaf de handmatige schets ontstond de **technische tekening**, die de geometrie en later ook de oppervlakteconditie en de **toleranties** (toelaatbare afwijkingen van de nominale maten en van vorm en plaats) vastlegde. Dit geheel duidt men tegenwoordig aan met de geometrische productspecificatie (**GPS**). In de loop van meer dan een eeuw is een steeds verfijnder stelsel van ISO-normen voor de GPS ontwikkeld, die de uitvoering en de interpretatie van de tekeningen bepalen. Bijkomende informatie, zoals benodigde aantallen, termijnen en benodigde materialen, werd vastgelegd op formulieren. Deze werden ontwikkeld op basis van de noodzakelijke informatiestromen.

De overdracht van de informatie van de tekening naar het product gebeurde aanvankelijk door het met de hand instellen van de bewerkingsmachines. Later, bij de massaproductie, stelde men ook de machines in met mechanische middelen zoals mallen en aanslagen.
De opkomst van computergestuurde machines maakte het mogelijk het werkstukprogramma met de geometrische en **technologische informatie** (informatie over de bewerking) aan de besturing toe te voeren, met behulp van een gemakkelijk te verwisselen informatiedrager. Hierdoor werd het mogelijk ook het vervaardigen van producten in kleine series te automatiseren.
Tegenwoordig is de geometrie van een werkstuk veelal vastgelegd in een driedimensionaal computermodel. Dit model kan dienen als uitgangspunt voor het maken van het werkstukprogramma.

Hiermee is het maken van deze programma's gemakkelijker, sneller en vooral veel betrouwbaarder geworden. Deze techniek staat bekend als CAD/CAM (*computer-aided design/computer-aided manufacturing*).

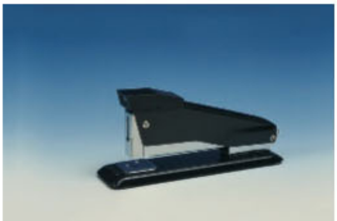
Voor de andere communicatiestromen worden computernetwerken steeds meer ingezet. Via internet gebeurt dit in toenemende mate wereldwijd tussen bedrijven die betrokken zijn bij de ontwikkeling en fabricage van een product.

1.3 Productvoorbeelden en productkentallen

In dit boek illustreren we de stof met praktijkvoorbeelden die zo veel mogelijk betrekking hebben op dezelfde voorbeeldproducten:

- Een nietmachine (zie figuur 1.7). Dit eenvoudige gebruiksvoorwerp dient als voorbeeld om de indeling van de productietechnieken duidelijk te maken en de keuzen die een productontwerper moet maken te laten zien.
- Het rompvoorstuk van een verkeersvliegtuig (zie figuur 1.8). Een zeer complex product waarvan er slechts enkele tientallen tot enkele honderden stuks per jaar worden gemaakt. Alleen al door de geringe aantallen zijn de fabricageprocessen geheel anders dan voor een massaproduct.
- Een scheerapparaat (zie figuren 1.9 en 1.10). Een schijnbaar eenvoudig product, waarvoor echter zeer geavanceerde fabricagemethoden worden toegepast en dat in zeer grote aantallen gemaakt wordt, tot enkele miljoenen per jaar van één model.

Figuur 1.11 geeft een aantal kenmerkende grootheden van een verzameling producten die karakteristiek zijn voor het gebied van de mechanische productie. De voorbeelden bestrijken het gehele gebied van massaproductie tot het vervaardigen van



Figuur 1.7 Nietmachine



Figuur 1.8 Het rompvoorstuk van een verkeersvliegtuig



Figuur 1.9 Philips-scheerapparaat



Figuur 1.10 Gedeeltelijke exploded view van het Philips-scheerapparaat

Product	Totaalserie	Productlevenscyclus	Ontwikkelingstijd	Productlevensduur	Aantal componenten
scheerapparaat	10^7	1 jaar	1 jaar	5 jaar	50
personenauto	10^6	5 jaar	5 jaar	10 jaar	10.000
vliegtuig	10^3	25 jaar	7 jaar	25 jaar	100.000
zeiljacht	10^2	5 jaar	½ jaar	30 jaar	1000
baggermolen	10^0	bouwtijd	1 jaar	15 jaar	50.000

Figuur 1.11 Productvoorbeelden met productkentallen

een uniek product. De productkentallen hebben een grote invloed op de inrichting en op de gang van zaken bij een productiebedrijf.
De **totaalserie** geeft de orde van grootte aan van het totale aantal stuks dat van één model (met eventuele varianten) wordt geproduceerd. De aantallen gelden voor producten die als een commercieel succes mogen worden beschouwd.

De **productlevenscyclus** is de tijdsduur waarin een product met succes kan worden verkocht. De productlevenscyclus van consumentenproducten is vaak zeer kort. Dit in tegenstelling tot de zeer lange productlevenscyclus van vliegtuigen. De in zijn tijd succesvolle Fokker F-27 (zie figuur 1.12a) was het allereerste passagiersvliegtuig met verlijmde romp- en vleugelonderdelen van aluminium. Er zijn er 793 van gebouwd en het type wordt beschouwd als de succesvolste opvolger van de legendarische DC3. Het stamt uit 1955 en werd geproduceerd tot 1987. Van de hierop gebaseerde opvolger, de F-50 (zie figuur 1.12b), zijn er van 1985 tot 1997 nog slechts 213 geproduceerd. De eerste Boeing 747 (serie 100) werd in 1968 geproduceerd. In 2011 werd het eerste toestel van de laatste serie (747-800), afgeleverd. Men verwacht in 2018 de productie van de 747 te beëindigen. Door de aanmerkelijke toename in het luchtverkeer in de afgelopen decennia zijn de productieaantallen aanmerkelijk toegenomen. Voor passagiersvliegtuigen geldt een minimale gebruiksduur van 25 jaar. Gedurende die tijd moeten er in ieder geval onderdelen voor onderhoud kunnen worden geleverd. De meeste onderdelen worden gedurende een periode van 40-50 jaar, naar behoefte, in serie geproduceerd.

De **ontwikkelingstijd** is de tijdsduur van het ontwikkeltraject tot een productierijp ontwerp. De **productlevensduur** is de gemiddelde levensduur van een exemplaar van het product.
De totaalserie is de belangrijkste factor bij het vaststellen van de productiemethode. De productlevenscyclus en de ontwikkelingstijd bepalen de gang van zaken bij de productontwikkeling. De productlevensduur bepaalt de inspanningen benodigd op het gebied van serviceverlening en van de archivering van gegevens. Het aantal componenten is een indicatie van de complexiteit, zowel van de productontwikkeling als van het fabricageproces.

Keuzeproblemen bij het ontwerpen

De ontwerper heeft voortdurend te maken met keuzeproblemen. De keuzen die hij maakt beïnvloeden zowel zijn ontwerp als de fabricagemethode. Laten we twee alternatieve ontwerpen voor een nietmachine bekijken (zie figuur 1.13). De ontwerper moet





Figuur 1.12 Prototype Fokker F-27, eerste vlucht in 1955 (a) en Fokker-50, 40 jaar later in productie (b)

met elkaar samenhangende keuzen maken ten aanzien van:
- materiaal;
- vormgeving;
- fabricagemethode;
- zelf maken of uitbesteden.

Deze keuzen worden bepaald door verschillende overwegingen op het gebied van functie en esthetiek.

Functie
Functionele eisen die aan de onderdelen van het apparaat gesteld worden, zijn sterkte, stijfheid en nauwkeurigheid.

Esthetische eisen
Het gewenste uiterlijk van het apparaat. Misschien moet het passen bij een lijn van aanverwante producten (ponsapparaat, ontnieter) of kantoormeubilair. Ook de wensen van de markt zijn van belang, bijvoorbeeld of het apparaat een zakelijke of modieuze uitstraling moet hebben.

Daarnaast worden de keuzen bepaald door overwegingen bij de mogelijke combinaties van materiaalkeuze en fabricagemethoden. Het gaat hierbij om de kostprijs, levertijd, beschikbare productietechnieken, leverbaarheid, onderhoud en recycling.

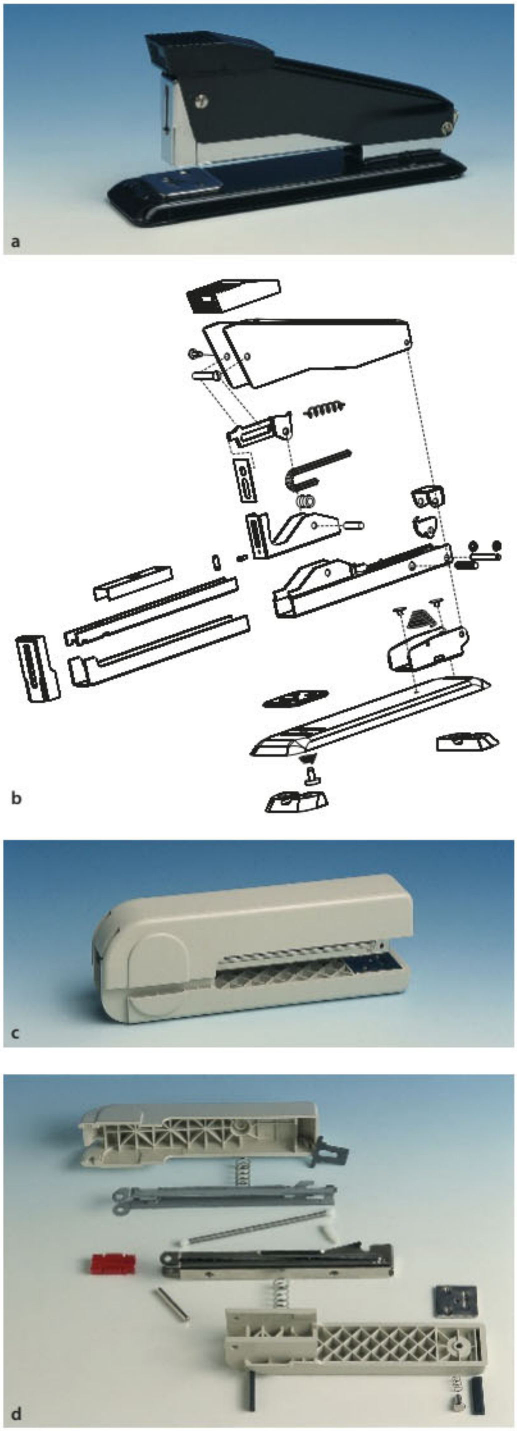
Kostprijs
Hierbij zijn de seriegrootte en de te verwachten varianten en het aantal onderdelen bepalend.

Levertijd
Een matrijs voor het spuitgieten van een kunststof product heeft een lange levertijd.

Beschikbare productietechnieken
Is de vereiste techniek binnen het bedrijf beschikbaar? Is men bereid zaken uit te besteden of wil men juist alles zelf doen? De antwoorden op deze vragen verruimen of beperken de keuzemogelijkheden.

Leverbaarheid
Het uitgangsmateriaal (soort, vorm en hoeveelheid) moet op de gewenste termijnen ook in de toekomst leverbaar zijn.

Onderhoud
Het product moet goed toegankelijk zijn voor onderhoud. Het gebruik van productgebonden gereed-



Figuur 1.13 Nietmachine uit staalplaat (a) met exploded view (b) en kunststof nietmachine (c) met exploded view (d)

schap ten behoeve hiervan moet zo veel mogelijk worden vermeden.

Recycling
Het product moet gemakkelijk demonteerbaar zijn en het materiaal moet opnieuw bruikbaar zijn.

1.4 Indeling van vervaardigingstechnieken

De beschouwde vervaardigingstechnieken omvatten het maken en verbinden van onderdelen. Ter illustratie wordt opnieuw de nietmachine gebruikt, in de versie die voornamelijk is vervaardigd uit staalplaat (zie figuur 1.13a, b).

1.4.1 De hoofdgroepen

DIN 8580 geeft een indeling van de vervaardigingstechnieken, gebaseerd op de veranderingen in de samenhang van het werkstukmateriaal. Langs deze weg zijn de volgende hoofdgroepen gevormd:
- oervormen;
- omvormen;
- scheiden en afnemen;
- verbinden;
- veranderen van materiaaleigenschappen;
- opbrengen van lagen.

Alle vervaardigingstechnieken zijn in een van deze hoofdgroepen onder te brengen. Er bestaan gevallen waarin een combinatie van twee of meer hoofdgroepen aan de orde is. Bij het maken van een product uit vezelversterkte kunststof is er bijvoorbeeld tegelijkertijd sprake van oervormen, verbinden en veranderen van materiaaleigenschappen. In de volgende paragraaf bespreken we alle hoofdgroepen kort en geven we aan in welke hoofdstukken deze uitgebreider aan de orde komen.

1.4.2 Omschrijvingen, toepassingen, voorbeelden

Oervormen

Bij **oervormen** wordt materiaal met een niet-gedefinieerde vorm rechtstreeks omgezet in een gedefinieerde vorm. In verreweg de meeste gevallen is het uitgangsmateriaal een vloeistof; we spreken dan over vloeibare vormgeving ofwel **gieten**. Vloeibaar materiaal wordt hierbij in een vorm gegoten. Na stolling of, bij sommige kunststoffen, uitharding is er een vormvast product ontstaan.
Soms is het uitgangsmateriaal een materiaal in poedervorm, dat onder hoge druk in een vorm wordt geperst en vervolgens verhit wordt tot temperaturen dicht bij het smeltpunt. Deze laatste stap noemt men **sinteren**. Ook op deze manier wordt een samenhangend onderdeel verkregen. Bij het verwerken van metalen of metaallegeringen spreken we van **poedermetallurgie (PM)**.

De **materiaalaangroeitechnieken** vormen een familie van methoden die behoren tot het oervormen. Deze technieken worden ook vaak aangeduid met de benamingen **additive manufacturing** en **3D-printen**. Hierbij wordt een onderdeel opgebouwd uit vormloos materiaal zonder dat daarvoor een vormbepalend gereedschap als een gietvorm nodig is.

Alle materialen, die niet worden gebruikt in de vorm waarin ze in de natuur voorkomen (bijvoorbeeld hout en steen), komen door een oervormproces tot stand, eventueel in een aantal stappen. Bij het gieten kan onderscheid gemaakt worden tussen het gieten van uitgangsmateriaal voor het maken van halffabricaten, zoals plaat, staf of profiel, en het rechtstreeks gieten van als zodanig te gebruiken onderdelen.

Voorbeeld van gieten:

> De drukknop van de nietmachine wordt gemaakt door vloeibare kunststof onder hoge druk in een metalen gietvorm, de matrijs, te spuiten; het proces heet dan ook **spuitgieten**. Hetzelfde geldt voor de meeste onderdelen van de in kunststof uitgevoerde nietmachine.

Oervormen behandelen we in hoofdstuk 3, de materiaalaangroeitechnieken in hoofdstuk 8.

Omvormen

Bij **omvormen** wordt het vermogen benut van materialen om onder invloed van krachten blijvende vervormingen te ondergaan. De samenhang van het materiaal blijft hierbij behouden, de massa en het volume blijven constant.

De omvormtechnieken voor metalen zijn te verdelen in twee groepen, massief omvormen en plaatomvormen. Bij massief omvormen kan het materiaal in alle richtingen grote vormveranderingen ondergaan. De benodigde krachten zijn groot

in vergelijking met de krachten die optreden bij het omvormen van plaatmateriaal. Bij **plaatomvormen** zijn de vervormingen loodrecht op het vlak van de plaat van ondergeschikt belang voor het vormen van het onderdeel.

Voorbeeld van massief omvormen:
De nietmachine is grotendeels uit staalplaat vervaardigd. Staalplaat ontstaat door een gegoten blok staal in een groot aantal stappen in dikte te reduceren door middel van walsen. Dit is een massief omvormproces.

Voorbeeld van plaatomvormen:
Een aantal onderdelen van de nietmachine wordt uit vlak plaatmateriaal gemaakt door middel van buigen.

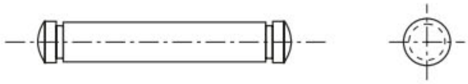
Omvormen behandelen we in hoofdstuk 4.

Scheiden en afnemen

Bij deze bewerkingen wordt de samenhang van het uitgangsmateriaal verbroken. Het product komt tot stand door het verwijderen van overtollig materiaal. Bij **scheiden** blijft het overtollige materiaal in principe als zodanig bruikbaar, bijvoorbeeld in het geval van het knippen van een brede plaat in smallere stroken.

Bij **afnemen** wordt het overtollige materiaal fijn verdeeld of zelfs chemisch gebonden, zodat er geen bruikbaar materiaal overblijft. Bij de vervaardiging van bepaalde vliegtuigonderdelen wordt op deze wijze circa 95% van het uitgangsmateriaal omgezet in spanen die alleen door recycling weer in bruikbaar materiaal zijn om te zetten.
Een scheidende bewerking kan op zichzelf een afnemende bewerking zijn, bijvoorbeeld het in schijven zagen van een lange staaf. Zagen is een afnemende bewerking. Het eindresultaat is een aantal bruikbare materiaaldelen en een beperkte hoeveelheid spanen.

Voorbeeld van het scheiden:
Vóór het omvormen van de plaatdelen van de nietmachine moet eerst een plaatdeel met de juiste omtrekvorm worden gemaakt, de **uitslag**. Plaatmateriaal wordt eerst in smalle stroken geknipt. Een snijstempel ponst vervolgens de uitslag met daarin de eventueel benodigde gaten uit de strook. Soms kan het afvalmateriaal nog voor andere delen worden gebruikt.



Figuur 1.14 Scharnierpen van de nietmachine uit figuur 1.13a, b

Voorbeeld van het afnemen:
De bolvormige uiteinden van de scharnierpen (zie figuur 1.14) ontstaan door het afnemen van het overtollige materiaal door middel van draaien. Dit geldt ook voor de groefjes waarmee het borgplaatje wordt vastgezet. De spaantjes zijn uiteraard niet meer bruikbaar.

Een algemeen kenmerk van de mechanische afnemende bewerkingen is dat de vorm van het product wordt verkregen door het sturen van een **universeel gereedschap** (een gereedschap dat niet voor een specifiek product is bestemd) langs het product. Dit noemt men het genereren van de vorm.

Bij oervormen, omvormen en scheiden is de vorm van het eindproduct meestal vastgelegd in een **productgebonden** gereedschap (een gereedschap dat speciaal voor dat product is bestemd). Hier is dus sprake van het **reproduceren** van een al bestaande vorm. Reproduceren verloopt in de regel veel sneller dan genereren en verdient daarom in principe de voorkeur bij het vervaardigen van producten in grote aantallen.

De scheidende bewerkingen behandelen we in hoofdstuk 7, de afnemende bewerkingen in de hoofdstukken 5 en 6.

Verbinden

Bij **verbinden** worden onderdelen verenigd tot een star geheel. De verbindingstechnieken zijn ruwweg in te delen in vijf hoofdgroepen:
- Pen-gatverbindingen, verder onder te verdelen in vaste en losneembare verbindingen.
- Verbindingen die tot stand komen door het materiaal van de onderdelen te smelten (lasverbindingen).
- Verbindingen met behulp van een tussenlaag (lijm- en soldeerverbindingen).
- Omvormverbindingen waarbij de verbinding tot stand komt door het omvormen van een of meer onderdelen.
- Verbindingen door elastisch vervormen, zoals krimp- en persverbindingen, waarbij het

onderling verschuiven van de delen wordt verhinderd door wrijving.

Alleen pen-gatverbindingen zijn losneembaar zonder de delen te beschadigen.

Voorbeeld van het verbinden:

De plaatdelen van de nietmachine zijn vast verbonden met klinknagels (vaste pen-gatverbindingen).

De verbindingstechnieken behandelen we in hoofdstuk 9.

Bij alle tot nu toe genoemde vervaardigingstechnieken is het doel het verkrijgen van de gewenste geometrie van het werkstuk. Bij de volgende twee hoofdgroepen is het doel het veranderen van de materiaaleigenschappen.

Veranderen van materiaaleigenschappen

Het veranderen van de materiaaleigenschappen betreft voornamelijk thermische behandelingen van metalen. Dit behoort tot het vakgebied van de materiaalkunde. De veranderingen kunnen (een groot deel van) het volume van het werkstuk betreffen, zoals bij de **bulkbehandelingen**, of een dunne laag aan het oppervlak van het werkstuk, zoals bij de **oppervlaktebehandelingen**.

Men verandert de materiaaleigenschappen:
- om gewenste eigenschappen van het eindproduct te verkrijgen, bijvoorbeeld slijtagebestendigheid;
- om het product beter te kunnen bewerken, bijvoorbeeld ter verbetering van de omvormbaarheid.

De materiaaleigenschappen kunnen ook veranderen als gevolg van het fabricageproces. Dit kan gewenst of ongewenst zijn.

Voorbeeld van gewenste veranderingen:

Bij het fabriceren van staalplaat ontstaat door een combinatie van walsbewerkingen en warmtebehandelingen een plaat met de gewenste dikte en mechanische eigenschappen.

Voorbeeld van ongewenste veranderingen:

Bij het omvormen van een halffabricaat tot een onderdeel kan materiaal door versteviging hard worden en daardoor moeilijk vervormbaar.

Het veranderen van materiaaleigenschappen behandelen we in hoofdstuk 10.

Opbrengen van lagen

Er bestaat een grote verscheidenheid aan technieken voor het opbrengen van **lagen**. Ze kunnen worden onderscheiden naar:
- functie (verbeteren van de duurzaamheid, verfraaien);
- opgebrachte materialen (organisch, metallisch, keramisch);
- toegepaste processen (chemisch, elektrochemisch, fysisch).

Voorbeelden van het opbrengen van lagen:

De plaatdelen van de nietmachine zijn deels gelakt, dit wil zeggen bedekt met organisch materiaal, opgebracht door middel van spuiten of dompelen. Andere delen zijn verchroomd, dus voorzien van een metallische deklaag, opgebracht met een elektrochemisch proces. Bovendien zijn voorafgaand aan deze behandelingen de plaatdelen gereinigd en chemisch behandeld ter verbetering van de hechting van de oppervlaktelaag.

Voorbeeld van een toegepast proces:

Aluminium delen (die geen deel uitmaken van de nietmachine) worden vaak geanodiseerd. Dit is een elektrochemisch proces waarbij het materiaal aan het oppervlak wordt omgezet in een harde en dichte oxidelaag, die verdere oxidatie tegengaat.

Het opbrengen van lagen behandelen we in hoofdstuk 10.

1.5 Het mechanisch materiaalgedrag in de fabricage

De materiaaleigenschappen die bepalend zijn voor de **bewerkbaarheid** (het gedrag van het materiaal tijdens de fabricage) verschillen sterk van de eigenschappen die van belang zijn voor het functioneren van het product. Bij het ontwerpen van het product is het dus nodig bij de materiaalkeuze ook rekening te houden met de bewerkbaarheid en het bewerkingsproces.
Bepalend voor het materiaalgedrag zijn:
- de eigenschappen van het uitgangsmateriaal, bepaald door de samenstelling en de structuur;

- de verandering van de materiaaleigenschappen die optreedt tijdens de bewerking, afhankelijk van de procescondities, onder andere bepaald door de spanningen, rekken en temperaturen.

Tijdens sommige bewerkingen ondergaat het werkstukmateriaal grote structuurveranderingen, waardoor de eigenschappen blijvend veranderen. In deze gevallen zijn het proces en de procescondities niet alleen medebepalend voor de materiaaleigenschappen tijdens de bewerkingen, maar ook voor die van het voltooide product. Dit is zeer duidelijk het geval bij de fabricage van producten uit kunststoffen, waarbij de polymere structuur tijdens de fabricage ontstaat. Iets dergelijks treedt echter ook op bij metalen, waarbij als gevolg van plastische vervorming versteviging optreedt. Dit kan leiden tot een aanzienlijke toename van de sterkte van het materiaal, maar ook tot scheurvorming en breuk. In het laatste geval zijn de eigenschappen van de constructie als geheel dus verslechterd.

In sommige gevallen moet het materiaal eerst een warmtebehandeling ondergaan om de structuur te krijgen die voor de bewerking is vereist, bijvoorbeeld om de weerstand tegen plastisch omvormen of de kans op scheurvorming te verminderen. Bij hogere temperaturen zijn de meeste materialen gemakkelijker te vervormen.

Bij vrijwel alle bewerkingen ontstaat warmte door de vervorming in het materiaal of door de wrijving tussen gereedschap en product. **Wrijving** is echter ook terug te voeren tot plastische deformatie op microschaal. Alle energie die aan een mechanisch bewerkingsproces wordt toegevoerd, wordt omgezet in warmte. In sommige gevallen wordt dankbaar gebruikgemaakt van deze warmte, bijvoorbeeld bij het warmwalsen. Hierdoor blijft het materiaal op de juiste temperatuur. In andere gevallen is geforceerde koeling nodig om de materiaaleigenschappen te beheersen en om vervorming en slijtage van het gereedschap te voorkomen.

Alle conditiebepalende factoren zijn terug te brengen tot enkele fysische principes, waarvan wrijving het belangrijkste is. Dit betreft vooral wrijving tussen werkstuk en gereedschap. Sommige processen, zoals walsen, zijn slechts mogelijk door het optreden van wrijving tussen walsrol en materiaal. Bij andere processen, zoals extruderen, zijn de wrijvingskrachten tussen gereedschap en werkstukmateriaal juist de beperkende factor. Bij snel verlopende processen, zoals verspanen, leidt wrijving tot zeer hoge temperaturen en dus tot intensieve slijtage van het gereedschap. Het toepassen van smering kan de wrijving beperken.

De grenzen van de uitvoerbaarheid van bewerkingsprocessen worden in de regel gevormd door:
- het ontstaan van extreme thermische en mechanische belasting van het gereedschap, leidend tot hoge slijtage en/of breuk;
- ongewenste vervorming (bijvoorbeeld bij dunwandige producten), scheurvorming (bij te grote lokale vervorming) en breuk van het product;
- beperkingen in de mogelijkheden van gereedschapswerktuigen door het geïnstalleerd vermogen, de toelaatbare of bereikbare krachten en de stijfheid; dit laatste in verband met nauwkeurigheid en trillingen.

Voor elke vervaardigingstechniek, afhankelijk van materiaalsoort, zijn er grenzen aan de realiseerbare vormen, afmetingen en toleranties.

Hoofdstuk 2 verschaft de elementaire kennis van de materiaalkunde die nodig is voor het bestuderen van de verschillende bewerkingstechnieken in de daaropvolgende hoofdstukken.

1.6 Produceren in een industriële omgeving

Assembleren of monteren is het samenstellen van onderdelen door middel van het toepassen van de verbindingstechnieken die we behandelen in hoofdstuk 9. In hoofdstuk 11 behandelen we de opzet van, en de werkwijze in, montageafdelingen.

Kwaliteit is de mate waarin een product voldoet aan de verwachtingen van de klant. **Totale kwaliteitszorg** bestrijkt het gehele voortbrengingsproces, van marktverkenning via ontwerp en productie tot en met serviceverlening. Veel kwaliteitsproblemen zijn meer van organisatorische dan van technische aard. Bij de technische kwaliteitsproblemen, vooral bij de fabricage van onderdelen, spelen de **werkplaatsmeettechniek** en het **niet-destructief onderzoek** een belangrijke rol. Kwaliteit is het onderwerp van hoofdstuk 12.

In hoofdstuk 13 behandelen we de productiemachines en het automatiseren van de fabricage.

De schakel tussen de ontwerp- en de fabricageafdeling is de **productievoorbereiding**. Deze afdeling stelt aan de hand van het productontwerp de fabricagemethode vast en zorgt voor de benodigde gereedschappen en werkinstructies. Ze vormt het onderwerp van hoofdstuk 14.

In hoofdstuk 15 beschrijven we het productiebedrijf als geheel. Dit hoofdstuk gaat vooral in op de organisatie en de procedures die nodig zijn om van alle losstaande activiteiten en processen een goedlopend geheel te maken.

In figuur 1.6 zagen we al dat de ontwerper voor het grootste deel de kostprijs van het product bepaalt. In hoofdstuk 16 geven we een samenvattend overzicht van product- en productiegericht ontwerpen gericht op de processen die zich afspelen bij het ontwikkelen van producten en productiemethoden met als doel dat de producten zo efficiënt mogelijk kunnen worden geproduceerd.

In hoofdstuk 17 behandelen we de relatie tussen de fabricagemethode en de kostprijs van het product.

De volgende paragrafen geven een inleiding op een aantal algemene onderwerpen. We kijken naar criteria voor het beoordelen van fabricagemethoden en de problemen die kunnen optreden bij het maken van keuzes op het gebied van industriële productie. Tot slot zetten we nog eens op een rijtje welke onderwerpen we in dit boek bespreken.

1.7 Criteria voor het beoordelen van fabricagemethoden

Al enkele malen hebben we erop gewezen dat het productontwerp in hoge mate bepalend is voor de **fabricagemethode**. Onder fabricagemethode wordt verstaan de reeks opeenvolgende bewerkingen en behandelingen die nodig zijn om van ruw materiaal te komen tot onderdelen die voldoen aan de specificatie. Bewerkingen zijn nodig om de gewenste geometrie te verkrijgen, eventueel via een aantal tussenstadia. Behandelingen zijn nodig om gewenste materiaaleigenschappen of een goed uiterlijk van een product te verkrijgen. We maken onderscheid tussen materiaalbehandelingen vóór en na een bewerking. De eerste soort dient om het materiaal voor het bewerken in een geschikte conditie te brengen, zoals het zachtgloeien voordat een omvormbewerking plaatsvindt. Materiaalbehandeling na een bewerking vindt onder meer plaats om ongewenste gevolgen van een bewerking teniet te doen. Een voorbeeld hiervan is het spanningsarm gloeien na het lassen, om de inwendige spanningen in het werkstuk te verminderen.
Vooruitlopend op gedetailleerdere beschrijvingen van de verschillende fabricagemethoden, volgt hier een globaal overzicht van de aspecten die de ontwerper in zijn overwegingen moet betrekken.

De doelmatigheid van een fabricagemethode is af te meten aan:
- productiekosten;
- productiesnelheid;
- flexibiliteit;
- kwaliteit;
- milieueffecten.

Je kunt deze criteria ook toepassen op een volledig productiesysteem. We bespreken ze in de volgende paragrafen.

1.7.1 Productiekosten

De kosten van een product zijn te splitsen in eenmalige kosten, kosten voor herhaalopdrachten en repeterende kosten.
Eenmalige kosten zijn kosten die één keer gemaakt moeten worden om het product te kunnen vervaardigen. Daarom worden deze kosten verdeeld over het totale aantal producten, de totaalserie. Voorbeelden van eenmalige kosten zijn:
- ontwerp- en ontwikkelingskosten;
- voorbereidingskosten, bijvoorbeeld bij het maken van werkinstructies;
- kosten van productgebonden machines en gereedschappen.

Kosten voor **herhaalopdrachten** zijn de kosten die gemaakt moeten worden om een serie producten (herhalingsorder) te vervaardigen. Onderdelen van producten die gedurende een langere tijd worden gebouwd, zoals personenauto's, fabriceert men in series. De kosten voor herhaalopdrachten komen bij elke **fabricageserie** terug, waardoor ze over het aantal producten van de fabricageserie worden verdeeld. Voorbeelden van deze kosten zijn:

- administratiekosten;
- kosten om een machine in te richten voor de fabricage van het betreffende product, de **inrichtkosten**.

Repeterende of **uitvoeringskosten** zijn de kosten die voor elk product terugkeren. Voorbeelden van deze kosten zijn:
- materiaalkosten;
- kosten van het gebruik van universele machines en gereedschappen;
- arbeidskosten.

De keuze van de fabricagemethode hangt dus in hoge mate af van de grootte van de totaalserie en de fabricageserie. Het belang van de seriegrootte keert in het hele boek steeds weer terug. De daling van de kostprijs bij toenemende productaantallen staat bekend als het **seriegrootte-effect**. De berekening van kosten wordt behandeld in hoofdstuk 17.

1.7.2 Productiesnelheid

Vrijwel altijd gaat een hoge **productiesnelheid** samen met lage repeterende kosten. Fabricageprocessen met een hoge snelheid zijn veelal sterk geautomatiseerd. Dit betekent wel dat de voorbereidingskosten en de kosten voor herhaalopdrachten betrekkelijk hoog zijn. Daarom zijn dit soort fabricageprocessen vooral geschikt voor grote productaantallen.
Een even belangrijk aspect van de productiesnelheid is de onderlinge afstemming van de snelheden van de verschillende processen in een reeks van opeenvolgende fabricage- of montageprocessen. Het duidelijkst komt dit tot uiting bij montagelijnen, die we behandelen in hoofdstuk 11.

1.7.3 Flexibiliteit

De **flexibiliteit** van een fabricage- of montagesysteem is de mate waarin het systeem kan worden aangepast aan nieuwe of gewijzigde producten of aan andere productaantallen. In de afgelopen decennia heeft de markt zich ontwikkeld in de richting van een toenemende verscheidenheid aan producten. Dit geldt zowel voor de markt voor consumentenproducten als voor die voor kapitaalgoederen. Afnemers willen dat producten worden aangepast aan hun wensen en kortere, maar vooral meer betrouwbare, levertijden. Processen die vooral geschikt zijn voor het produceren van zeer grote aantallen identieke producten zullen in het algemeen zeer efficiënt produceren, maar hebben een lage flexibiliteit. Hoofdstuk 13 behandelt deze materie uitvoerig.

1.7.4 Kwaliteit

De producteigenschappen, de te betalen prijs, de levertijd en de service bepalen samen de kwaliteit van het product. Kwaliteit gaat dus niet zonder meer samen met hoge nauwkeurigheid of kostbare grondstoffen. De kwaliteit van het product wordt bepaald door:
- de mate waarin het productontwerp overeenkomt met de wensen of verwachtingen van de klant;
- de mate waarin het product overeenkomt met de productspecificatie;
- de ondersteuning van het product in de vorm van handleidingen, onderhoud, onderdelenvoorziening en garantieverlening;
- de milieubelasting die bij productie, gebruik en sloop van het product optreedt.

De productkwaliteit is het resultaat van de ontwerpkwaliteit en de kwaliteit van het productieproces. Bij elke bewerking of behandeling kan er iets misgaan, waardoor werkstukken niet aan de kwaliteitseisen voldoen. Kwaliteitsbeheersing is een belangrijk aspect van de productietechniek. Door kwaliteitscontrole kunnen producten worden afgekeurd. De **uitvalsfractie** u is een belangrijke maatstaf voor de kwaliteit van productieprocessen. Ook de **opbrengst** o ($o = 1 - u$) wordt hiervoor gebruikt. Het komt erop neer dat je meer producten zal moeten maken dan je strikt gezien nodig hebt om uiteindelijk het gewenste aantal goede producten te kunnen afleveren. De uitvalsfractie zegt ook iets over de betrouwbaarheid van productieprocessen.

Een hoge kwaliteit hoeft overigens niet altijd samen te gaan met een hoge kostprijs. In hoofdstuk 12 zie je dat het verhogen van de kwaliteit vaak zelfs samengaat met een lagere kostprijs!

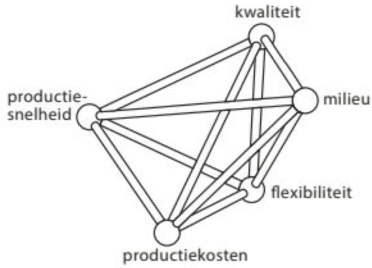
1.7.5 Milieueffecten

De activiteiten om milieuverontreiniging terug te dringen waren in het verleden voornamelijk gericht op het opheffen van vervuiling en op het verantwoord verwerken van afval. Tegenwoordig volgt men een meer doelgerichte aanpak, vaak aangeduid met het overkoepelende begrip **milieuzorg**. Hierbij

richt men zich op het voorkómen van het ontstaan van schadelijke stoffen en schadelijke effecten. Men loopt hierbij echter het risico dat de oude, bekende schadelijke invloed wordt vervangen door nieuwe, nog onbekende, effecten. Het is namelijk vaak moeilijk om het totale effect van een milieubeschermende maatregel van begin tot eind te overzien.

In de productie staat men voor de taak om de schadelijke milieueffecten van de voortbrengingsprocessen zo veel mogelijk te beperken. Het milieuprobleem moet op effectieve wijze worden opgelost, maar daarnaast moet het technisch resultaat van het vervangende proces op zijn minst gelijkwaardig zijn, en het proces dient praktisch uitvoerbaar te zijn. Zo nodig moet men hogere kosten accepteren. In enkele gevallen is gebleken dat bij een vervangend proces zelfs kostenbesparing mogelijk is, doordat er minder energie en hulpstoffen worden gebruikt.

Meer in het algemeen geldt dat het ontwerp de grootste invloed heeft op de milieueffecten van het product. Dit geldt zowel voor de fabricage als voor het gebruik en het beëindigen van de levensduur van het product. Het ontwerp legt het toegepaste materiaal vast en daarmee voor het overgrote deel ook de fabricagemethode. De fabricage van aluminium vraagt bijvoorbeeld veel energie. Bij een stationaire constructie kan een minder energie-intensief materiaal de voorkeur verdienen. Bij de toepassing van aluminium in bijvoorbeeld metrotreinstellen kan een veelvoud van de extra energie terugverdiend worden tijdens het gebruik, omdat aluminium zo'n licht materiaal is. Wanneer al bij het ontwerpen rekening wordt gehouden met hergebruik, is het toepassen van aluminium uit het oogpunt van energieverbruik in nog meer gevallen voordelig.
In de levenscyclus van producten kunnen we vier fasen onderscheiden: productontwikkeling, fabricage en montage, gebruik en afvoer. Het doel van **milieugerichte productontwikkeling** is het ontwikkelen van producten die gedurende hun gehele levenscyclus een minimum aan milieuschade veroorzaken. De invoer van een productieproces bestaat uit grondstoffen en energie, en de uitvoer bestaat uit producten, afval en emissies. Voor de bestudering van milieuschade bij de productontwikkeling zijn de volgende **MET-factoren** van belang:
- materialen: spaarzaam en selectief gebruik van grondstoffen; hergebruik van grondstoffen zo veel mogelijk en op een zo hoog mogelijk gebruiksniveau.
- energie: energie-extensivering van producten door beperking van de energie-inhoud van producten en van het energieverbruik tijdens de gebruiksfase.
- toxiciteit: beperking van het vrijkomen van afval en emissies.



Figuur 1.15 De samenhang tussen de beoordelingscriteria

In toenemende mate stellen overheden wettelijke eisen aan producten en productiebedrijven betreffende het beperken van milieuschade. De internationale norm ISO 14001 is hierbij van grote betekenis. Deze norm geeft regels voor milieuzorgsystemen.

1.7.6 Samenhang tussen de criteria

Figuur 1.15 geeft aan dat de hier besproken aspecten onverbrekelijk met elkaar samenhangen. Het kiezen van de beste oplossing betekent dus het tegen elkaar afwegen van de effecten van de kosten, productiesnelheid, flexibiliteit, kwaliteit en milieueffecten.
Figuur 1.16 geeft een overzicht van de waardering van de verschillende bewerkingsprocessen ten aanzien van de genoemde criteria.

1.8 Keuzeproblemen

In paragraaf 1.7 hebben we beoordelingscriteria besproken die een belangrijke rol spelen in de industriële productie. Deze criteria staan niet op zichzelf, maar vertonen een sterke samenhang. In de volgende hoofdstukken is veelvuldig sprake van meerdere mogelijkheden, waaruit op een verstandige wijze keuzen moeten worden gemaakt. Ontwerpers en productie-ingenieurs worden als gevolg daarvan veelvuldig gedwongen om bij het maken van keuzen prioriteiten te stellen en com-

promissen te sluiten. We spreken van een keuzeprobleem indien op grond van een aantal overwegingen een beredeneerde keuze gemaakt moet worden waarbij verschillende belangen tegen elkaar moeten worden afgewogen. Het maken van een keuze wordt moeilijker naarmate er meer mogelijkheden zijn. De waardering van verschillende belangen is een probleem op zich, vooral bij factoren die moeilijk te kwantificeren zijn. Het vastgestelde doel moet zo goed mogelijk worden bereikt, maar het is niet altijd goed mogelijk om een doel op kwantitatieve gronden vast te stellen. Denk maar aan veiligheid of aan esthetische factoren. We geven hier een korte opsomming van de belangrijkste kenmerken van keuzeproblemen:

- Het doel – Dit kan enkelvoudig of meervoudig zijn. Voorbeelden van enkelvoudige doelen zijn: zo snel mogelijk of zo goedkoop mogelijk. Een voorbeeld van een meervoudig doel is: snel en goedkoop. Bij meervoudige doelen kan in vrijwel alle gevallen niet aan alle afzonderlijke eisen tegelijkertijd worden voldaan. Je zal dan prioriteiten moeten stellen, wegingsfactoren moeten toekennen en afwegingen moeten maken.
- Het belang – Uiteindelijk zal het belang in dit vakgebied, binnen de grenzen van de gewenste kwaliteit en levertijd van een product, vaak het beste in geld uitgedrukt kunnen worden. Lage kosten zijn altijd een belangrijk concurrentievoordeel. Bij een extreem korte vereiste levertijd is de totale doorlooptijd van de order het belangrijkst, waarbij kwaliteit en kosten als grens zullen fungeren.
- De randvoorwaarden – Het is van het grootste belang om van tevoren vast te stellen binnen welke grenzen een oplossing moet liggen. Hoeveel mag de realisatie van een product kosten? Wat kosten concurrerende producten?
- De bekendheid – Sommige problemen komen dagelijks vele malen voor; het zijn routineproblemen. Andere problemen komen veel minder vaak voor, maar de oplossing ervan is bekend. Dan zijn er nog zeldzame keuzeproblemen waarbij veel onbekende factoren betrokken zijn. Kennis en de tijd die nodig is om te kiezen speelt hierbij een grote rol.
- De complexiteit – Het aantal keuze-elementen dat in een keuzeproces een rol speelt en het aantal factoren dat bij het maken van de keuze moet worden betrokken.
- Het aantal betrokken partijen – Dagelijks worden door alle productiemedewerkers zelfstandig allerlei keuzeproblemen opgelost. Vaak gebeurt dit onbewust, zeker als het weinig belangrijke problemen en routineproblemen betreft.
  Voor belangrijke, complexe en onbekende keuzeproblemen is samenwerking gewenst met anderen, vaak ook uit andere disciplines. Voor uitzonderlijk complexe problemen worden wel projectgroepen ingesteld, die gedurende langere tijd aan eenzelfde probleem werken. Dit komt bijvoorbeeld voor bij de ontwikkeling van een nieuw product, de aanschaf van een hoogwaardige machine en de inrichting van een fabriek.

In dit boek komen op verschillende plaatsen meer gedetailleerde voorbeelden van eenvoudige keuzeproblemen aan de orde. Het oplossen van keuzeproblemen behoort tot de kern van de taak van een ingenieur.

1.9 Kennis: overzicht en detail

Het vakgebied van de productietechniek omvat een veelheid van disciplines en technieken en kan vanuit meerdere invalshoeken benaderd worden. In dit boek worden sommige onderwerpen meer

Beoordelingscriteria	Oervormen	Omvormen	Scheiden en afnemen	Verbinden	Veranderen van materiaaleigenschappen
kosten	gs: hoog a: laag	gs: hoog a: laag	gs: gemiddeld a: hoog	k: laag a: hoog	k: gemiddeld tot hoog a: laag
productiesnelheid	hoog	hoog	gemiddeld tot laag	gemiddeld tot laag	laag
kwaliteit	gemiddeld tot laag	gemiddeld tot laag	gemiddeld tot laag	gemiddeld tot laag	hoog
flexibiliteit	laag	laag	hoog	hoog	gemiddeld tot laag

gs: gereedschapskosten a: arbeidskosten k: kapitaalkosten

Figuur 1.16 Waardering van verschillende bewerkingsprocessen ten aanzien van de beoordelingscriteria

in detail behandeld, terwijl andere onderwerpen meer in de breedte besproken worden. We trachten inzicht te geven in en een overzicht te geven van de meest voorkomende, maar ook zeer uiteenlopende, methoden en technieken die toegepast worden bij het maken van discrete producten. (Voor de definitie van dit begrip zie 'Ten Geleide') In grote lijnen neemt het integratieniveau van de beschouwing toe naarmate je verder in het boek vordert. De details van de voor de beschrijving gebruikte informatie nemen juist af. Het is onze bedoeling een goed overzicht te geven van de grondbeginselen, maar ook van het vakgebied.

In de eerste hoofdstukken gaat het om materialen (hoofdstuk 2) en bewerkingsmethoden (hoofdstukken 3 t/m 8) voor het maken van onderdelen. De nadruk ligt hierbij op mechanische eigenschappen en materiaalgedrag. Naast dat we verschillende basisvormen behandelen van het verwerken en bewerken van materialen, met de daaraan verbonden belangrijke fabricageaspecten, komen onderwerpen als montage en, daarmee samenhangend, verbindingstechnieken aan de orde (hoofdstukken 9 en 11). Het veranderen van materiaaleigenschappen, bijvoorbeeld voor een betere bewerkbaarheid, en van oppervlakte-eigenschappen, voor een beter functioneel gedrag van componenten, behandelen we in hoofdstuk 10.
Bij de behandeling van bijvoorbeeld de meest voorkomende technieken voor materiaalbewerking spelen de verschillende typen gereedschappen en bewerkingscondities een belangrijke rol. De behandeling van de bewerkingsprocessen is van belang voor de beschrijving van de verschillende typen productiemachines in hoofdstuk 13. Dit is een onderwerp waarop we niet zo diep ingaan, omdat het ontwerpen van deze complexe machines voor de lezers van dit boek niet aan de orde is. De kennis van bewerkings- en montageprocessen vormt samen met kennis van de productieapparatuur de basis voor alle andere processen bij het voortbrengen van discrete producten.
Om producten van goede kwaliteit tegen acceptabele kosten te kunnen maken, moet het productieproces goed worden voorbereid, georganiseerd en bewaakt (zie hoofdstuk 14). Bij de uitvoering van productieprocessen spelen uiteindelijk de beheersing van de productkwaliteit en de productiekosten de belangrijkste rol (zie hoofdstukken 12 en 17). De technische bedrijfsvoering en de logistieke organisatie hebben binnen een productiebedrijf als taak om het hele voortbrengingsproces te integreren (zie hoofdstuk 15). **Logistiek** is het zorgen voor beschikbaarheid van mensen, materialen en middelen op de juiste plaats, in de juiste hoeveelheden op het juiste tijdstip.
De hoogste verantwoordelijkheid hiervoor ligt bij het bedrijfsmanagement. Hoofdstuk 15 beschrijft mogelijke verschillen in bedrijfsstructuur, de organisatie van productieprocessen en de daarmee samenhangende methoden voor het besturen en beheersen van productstromen in fabrieken. Keuzes op dit gebied zijn afhankelijk van de doelstelling van een bedrijf. Ten slotte besteden we in hoofdstuk 14 en 16, in een brede context, aandacht aan product- en productieontwikkeling als onderdeel van het totale voortbrengingsproces.

Hoe hoger het integratieniveau van de beschouwing, hoe complexer de samenhang tussen de onderdelen is. Hoe meer **integratie** van functies en onderdelen er plaatsvindt bij product- en procesontwerp, hoe moeilijker het wordt om overzicht te houden, het onderwerp te bestuderen en een oplossing te kiezen. Een goed overzicht van complexe problemen is alleen mogelijk wanneer er voldoende relatie met het detail blijft bestaan.

Samenvatting

In een korte schets van de ontwikkeling van de industriële onderneming hebben we aangegeven welke rol de productietechniek hierbij gespeeld heeft.

Doordat productieprocessen complexer worden, is steeds meer communicatie en samenwerking nodig tussen verschillende bedrijfsfuncties en zelfs tussen bedrijven die elkaar toeleveren. Het is daarom noodzakelijk dat ook ontwerpers voldoende inzicht in deze processen hebben.

De productkentallen zoals totaalserie, productlevenscyclus, ontwikkelingstijd, productlevensduur en het aantal componenten hebben grote invloed op de aard en werkwijze van een productiebedrijf.

Bij het ontwerpen moeten steeds keuzen worden gemaakt. Belangrijke keuzen zijn de materiaalkeuze en de vormgeving. De keuzen beïnvloeden zowel de eigenschappen van het product als de fabricagemethode.

Het vakgebied van de vervaardigingstechnieken is systematisch in kaart te brengen door de indeling in de hoofdgebieden oervormen, omvormen, scheiden en afnemen, verbinden, veranderen van materiaaleigenschappen en het opbrengen van lagen.

Het mechanisch materiaalgedrag in de fabricage wordt in belangrijke mate bepaald door materiaalspanningen en temperatuur. Het effect van wrijving kan hierbij niet buiten beschouwing blijven.

Bij het produceren in een industriële omgeving zijn de organisatie en de werkprocedures van groot belang om alle benodigde activiteiten zorgvuldig op elkaar af te stemmen. Belangrijke schakels zijn de productievoorbereiding en de kwaliteitszorg.

De doelmatigheid van productieprocessen kan worden beoordeeld aan de hand van de criteria kosten, productiesnelheid, flexibiliteit, kwaliteit en milieueffecten. Bij het ontwerpen en produceren kunnen verschillende keuzeproblemen optreden.

Literatuur

1.1 Lintsen, H.W. (red.), *Made in Holland*, Walburg Pers, Zutphen, 2005, ISBN 978-90-5730-349-4.

1.2 Jones, D.T., Womack, J.P., *The Machine that changed the World*, Harper, New York,2007.

1.3 Kalpakjian S., Schmid S.R., *Manufacturing Engineering and Technology*, 7th edition, Pearson, 2014, ISBN978-0-13-3128741. General Introduction; Part IX: Manufacturing in a Competitive Environment.

Oefenvragen

1.1 Waarom vormt de uitvinding van de stoommachine het startpunt van de overgang van het ambachtelijke naar het industriële bedrijf?
Noem enkele kennisgebieden die nodig waren om een bruikbare stoommachine te kunnen bouwen.

1.2 Noem een aantal kenmerken waarin ambachtelijke en industriële bedrijven zich van elkaar onderscheiden.

1.3 Welke conclusie kun je trekken uit figuur 1.6?

1.4 Omschrijf de begrippen oervormen, omvormen, scheiden en afnemen.

1.5 Noem en omschrijf vier belangrijke verbindingstechnieken.

1.6 Noem een aantal redenen voor het opbrengen van lagen.

1.7 Geef het verschil aan tussen de klassieke en de nieuwe benadering van het beperken van milieuschade.

1.8 Omschrijf het begrip kwaliteit. Noem enkele belangrijke aspecten van de productkwaliteit.

inclusief website!

Op www.industrieleproductie.nl vind je de antwoorden op deze vragen, maar ook extra studie- en oefenmateriaal, zoals video's en meer opgaven.

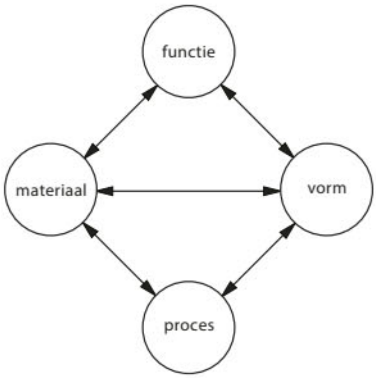
2 Materialen

In dit hoofdstuk behandelen we de belangrijkste begrippen uit de materiaalkunde. Deze begrippen zijn noodzakelijk voor het begrip en de keuze van bewerkingsprocessen.
Het gaat hierbij om het kwantificeren van materiaaleigenschappen en om het begrijpen van het materiaalgedrag vanuit de structuur.
We besteden aandacht aan metalen en kunststoffen, maar ook aan keramisch materiaal en composieten.

2.1 Inleiding

In hoofdstuk 1 hebben we toegelicht dat bij de vervaardiging van producten het werkstukmateriaal wordt getransformeerd. Dit geschiedt onder invloed van externe krachten, temperatuur en andere fysische grootheden. Het type werkstukmateriaal heeft hierop een significante invloed. Om de essentie van de belangrijkste vervaardigingsprocessen te kunnen begrijpen, behandelen we in dit hoofdstuk de hiervoor noodzakelijke basiskennis van de materiaalkunde. Als je al materiaalkundige voorkennis hebt, laat dit hoofdstuk zien welke onderwerpen en begrippen uit de materiaalkunde een rol spelen in de volgende hoofdstukken, en hoe diepgaand we ze zullen behandelen.

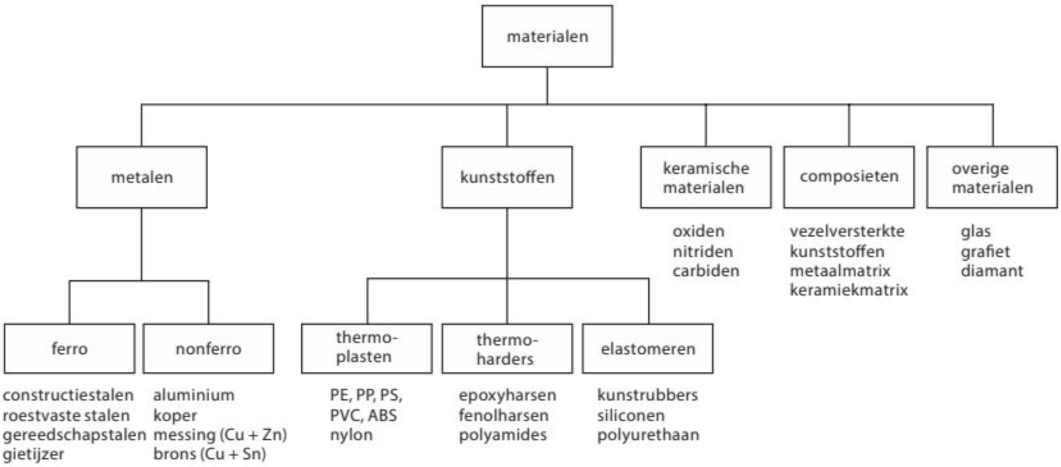
Het scheerapparaat uit figuur 1.9 is samengesteld uit onderdelen die van verschillende materialen zijn vervaardigd. Zo bestaat de behuizing uit kunststof,



Figuur 2.1 Samenhang tussen materiaal, functie, vorm en productieproces

bestaan de scheerkoppen uit staal en bestaat de bedrading uit koper. Andere complexe producten, zoals auto's, zijn gemaakt uit tientallen verschillende materialen.
De materiaalkeuze wordt in de eerste plaats bepaald door de functionele eisen die aan het betreffende productonderdeel worden gesteld, zoals de vereiste sterkte, stijfheid en/of corrosiebestendigheid. Maar ook esthetische aspecten met betrekking tot de vorm en oppervlaktegesteldheid maken deel uit van het eisenpakket. Daarnaast moet bij de materiaalkeuze rekening gehouden worden met het productieproces. Bij de vormgeving van een productonderdeel zal de ontwerper dus rekening moeten houden met functionele en productietechnische eisen en wensen. Deze eisen en wensen hebben invloed op de materiaalkeuze. Deze onderlinge samenhang is in figuur 2.1 schematisch weergegeven. Daarnaast spelen ook kostenoverwegingen een belangrijke rol bij de materiaalkeuze. In de massafabricage maken materiaalkosten doorgaans meer dan 50% van de totale productiekosten uit (zie paragraaf 17.2).
Figuur 2.2 geeft een indeling van veel in de techniek toegepaste materialen.

In de praktijk spelen behalve mechanische eigenschappen ook fysische en chemische eigenschappen een rol, zoals de warmtegeleiding en de corrosiegevoeligheid van een materiaal, maar daar zal in dit hoofdstuk verder geen aandacht aan besteed worden. Bedenk dat niet alleen de materiaaleigenschappen van het werkstuk belangrijk zijn, maar ook die van de gebruikte gereedschappen. Door een bewerkingsproces kunnen de eigenschappen van het werkstukmateriaal aanzienlijk veranderen. Door koudwalsen wordt aluminium plaat bijvoorbeeld aanzienlijk harder.



Figuur 2.2 Indeling van veel in de techniek toegepaste materialen

Binnen de materiaalkunde onderscheiden we drie gebieden:
- **Fundamentele materiaalkunde** (*materials science*). Onderzoek op dit gebied vindt meestal aan een natuurkundige faculteit plaats en richt zich vooral op de invloed van de chemische samenstelling en de structuur van een materiaal op de mechanische eigenschappen, en op eigenschappen als warmtegeleiding, halfgeleiding en supergeleiding.
- **Materiaalbereiding** (*materials production*). In dit gebied houdt men zich vooral bezig met de bereiding van materialen uit grondstoffen.
- **Toegepaste materiaalkunde** (*materials engineering*). Hierin richt men zich voornamelijk op de materiaalkeuze en -toepassing bij het ontwerp en de fabricage van producten. In dit boek besteden we vooral aandacht aan dit gebied.

2.2 Structuur van metalen

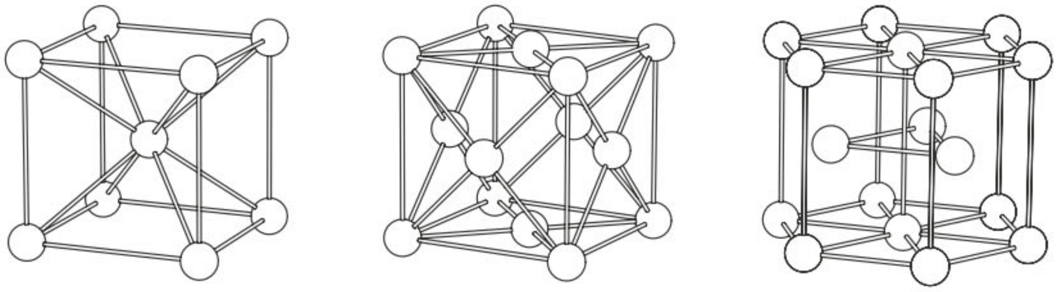
In deze paragraaf kijken we naar de structuur van metalen. We onderscheiden hierbij eenkristallen en polykristallijn materiaal. We behandelen de gietstructuur en de kneedstructuur.

2.2.1 Eenkristallen

Wanneer een metaal vanuit vloeibare toestand afkoelt en stolt, ontstaan **kristallen**. Deze kristallen kenmerken zich door een regelmatige ordening van atomen binnen het kristalrooster. Bij zuivere metalen komen de drie volgende kristalroosterstructuren voor:
- Kubisch ruimtelijk gecentreerd rooster. Voorbeelden van metalen met zo'n rooster zijn ijzer bij kamertemperatuur en wolfram.
- Kubisch vlakgecentreerd rooster. Voorbeelden van metalen met zo'n rooster zijn ijzer bij hoge(re) temperatuur, aluminium en koper.
- Hexagonaal dichtst gestapeld rooster. Voorbeelden van metalen met zo'n rooster zijn zink en titanium.

Figuur 2.3 laat de **eenheidscellen** zien waaruit deze structuren zijn opgebouwd. Het materiaal kan in eerste instantie als één groot kristal worden beschouwd, een zogenaamd **eenkristal**. Zo'n eenkristal bestaat uit een groot aantal netjes naast elkaar gerangschikte eenheidscellen. Binnen een kristal zijn de materiaaleigenschappen, zoals sterkte en stijfheid, richtingsafhankelijk; deze richtingsafhankelijkheid van eigenschappen noemen we **anisotropie**.

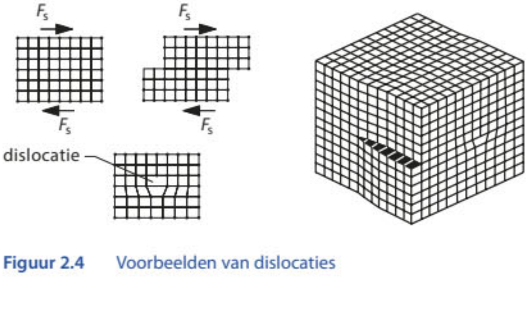
Omdat bij vormgevingsprocessen zoals omvormen, scheiden en verspanen altijd deformatie van het materiaal optreedt, is het belangrijk te bekijken wat er tijdens deze deformatie binnen een eenkristal gebeurt.
Bij elastische deformatie door trekbelasting in één richting wordt de roosterafstand tussen twee atomen in trekrichting iets vergroot en in de richtingen loodrecht hierop iets kleiner; de eenheidscellen veranderen iets van vorm en volume. Na het



Figuur 2.3 Kristalroosterstructuren

wegnemen van de belasting neemt het materiaal zijn oorspronkelijke vorm weer aan.
Bij plastische deformatie zal na het wegnemen van de belasting een blijvende vervorming te zien zijn. Er treedt dan ook een heel ander deformatiemechanisme op, waarbij pakketten atomen over elkaar afschuiven. Het afschuifproces treedt in eerste instantie op langs een (relatief) dichtst gestapeld glijvlak in een dichtst gestapelde glijrichting. Dit gebeurt zodra de schuifspanning in de betreffende richting, dat wil zeggen de kracht per oppervlakte-eenheid langs het glijvlak, een kritische waarde overschrijdt. Omdat bij plastische deformatie de gemiddelde roosterafstand niet verandert, blijft het volume constant. Metalen met een hexagonaal rooster, zoals zink en magnesium, zijn in het algemeen moeilijker vervormbaar dan metalen met een kubisch rooster.

Een kristalrooster dat tijdens het stollingsproces ontstaat, is nooit vrij van **roosterfouten**. We kunnen hierbij onderscheid maken tussen puntfouten (bijvoorbeeld het missen van een atoom), lijnfouten, oppervlaktefouten en volumefouten, zoals de aanwezigheid van een oxidedeeltje in het materiaal. Lijnfouten, meestal **dislocaties** genoemd, spelen een wezenlijke rol bij het plastisch deformeren van



Figuur 2.4 Voorbeelden van dislocaties

een kristal. Rond een dislocatie zal het kristalrooster vervormen (zie figuur 2.4). Het afschuiven van pakketten atomen over elkaar kan gezien worden als het verplaatsen van dislocaties. Bij voortschrijdende plastische deformatie neemt het aantal dislocaties toe. Wanneer de belasting op het kristal vergroot wordt, neemt het aantal afschuifprocessen binnen het kristal toe en zullen de lopende dislocaties met bijbehorende roosterverstoringen elkaar steeds meer gaan hinderen. De vervormingsmogelijkheden worden hierdoor steeds meer beperkt. Er treedt **(koud)versteviging** op in het kristal. Dit houdt in dat de weerstand tegen vervorming toeneemt bij verdergaande vervorming, althans in een temperatuurgebied dat voldoende ver onder het smeltpunt ligt.

2.2.2 Polykristallijn materiaal

Tot nu toe hebben we uitsluitend gekeken naar een materiaal dat uit één groot eenkristal bestaat en anisotrope eigenschappen heeft. In werkelijkheid bestaan de meeste metalen werkstukken echter uit een zeer groot aantal kristalletjes. Omdat de oriëntatie van de aan elkaar grenzende kristalletjes in het algemeen verschillend is, sluiten de kristalroosters op de kristalgrenzen niet netjes op elkaar aan; de overgangslaag is wat onregelmatig. Bij plastische deformatie van het polykristallijne materiaal verplaatsen de dislocaties binnen een kristal zich tot aan de kristalgrenzen, omdat de aangrenzende kristallen andere glijrichtingen en anders georiënteerde glijvlakken hebben. Ze lopen in eerste instantie vast op de kristalgrenzen, waar ze moeilijk overheen kunnen. Een verdergaande beperking van de vervormingsmogelijkheden leidt tot koudversteviging van het polykristallijne materiaal. Relatief veel kristalgrenzen per mm^3 betekent dat een materiaal

fijnkristallijn is. Dit deformeert plastisch minder gemakkelijk en is dus sterker dan een grofkristallijn materiaal. Door versteviging worden de sterkte en de hardheid van een metaal vergroot, maar neemt de taaiheid af. Hiervan wordt bijvoorbeeld gebruikgemaakt bij het trekken van draad en het koudwalsen van plaat (zie hoofdstuk 4).

Meestal zijn de kristalletjes van polykristallijn materiaal willekeurig ten opzichte van elkaar georiënteerd. Als gevolg hiervan zal het materiaal als geheel zich **isotroop** gedragen; de eigenschappen zijn in alle richtingen gelijk. Door deformatieprocessen (zoals koudwalsen) en/of warmtebehandelingen kan een voorkeursoriëntatie ontstaan, met anisotrope mechanische eigenschappen als gevolg.

Dikwijls bestaat een metaal niet uit één soort atomen, maar bewust uit meerdere atoomsoorten. In dat geval spreken we van een **legering**. Legeringselementen worden aan het basismetaal toegevoegd om doelbewust de eigenschappen van het materiaal aan te passen aan gestelde eisen. Het gaat dan bijvoorbeeld om de sterkte. Bij een legering kunnen de legeringselementen op de volgende wijzen in de structuur zijn opgenomen:

- Mengkristallen. Het kristalrooster is dat van het basismetaal, waarin bepaalde atomen van het legeringselement de plaats innemen van die van het basismetaal. Het verschil in atoomafmeting leidt tot vervorming van het kristalrooster, waardoor inwendige spanningen ontstaan die de sterkte doen toenemen. Men noemt dit effect wel **oplosharden**.
- Mengsel van verschillende typen kristallen, waarbij de legering dus uit meerdere vaste fasen bestaat. Dit kunnen zowel mengkristallen zijn als kristallen die uit één soort atomen bestaan.
- Chemische verbinding van het basismetaal met een legeringselement. Het legeringselement kan zowel een metaal zijn als een niet-metallisch element, zoals koolstof.

Veel in de praktijk toegepaste metalen zijn in feite metaallegeringen. **Staal** is een ijzerlegering met een koolstofpercentage tot 1,5% en wordt zonder een significante hoeveelheid legeringselementen ongelegeerd staal genoemd. Staal heeft de eigenschap dat het bij hogere temperaturen goed omvormbaar (smeedbaar) is. Aan veel staalsoorten zijn bewust nog andere legeringselementen toegevoegd; men spreekt dan van gelegeerde stalen. Een belangrijke groep vormen de **corrosievaste stalen**, vaak ook als roestvast of roestvrij staal aangeduid. Het betreft hier chroomstalen en chroomnikkelstalen.

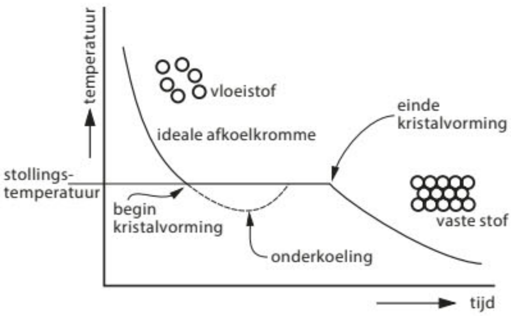
Gietijzer is een gietbare ijzer-koolstof-siliciumlegering met een koolstofpercentage dat tussen 2,5% en 4,0% ligt. In het algemeen komt een gedeelte van de koolstof in de vorm van grafiet in de structuur voor.

Messing en **brons** zijn legeringen met koper als basismetaal, waaraan respectievelijk zink en tin als legeringselement zijn toegevoegd.

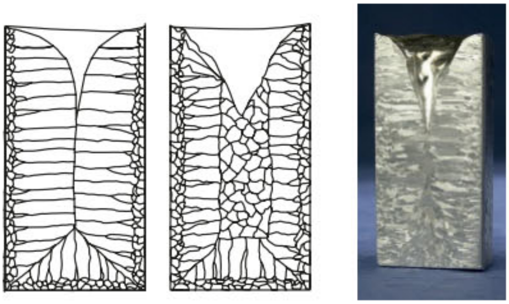
2.2.3 Gietstructuur en kneedstructuur

Gieten is een vormgevingsproces waarbij een product wordt vervaardigd door een gietvorm te vullen met vloeibaar metaal. Dat metaal laat men vervolgens afkoelen en **stollen** (zie hoofdstuk 3). Tijdens het stollen van een metaal gaan de atomen over van de vloeibare in de vaste fase. De atomen rangschikken zich keurig regelmatig in het kristalrooster, waarbij een volumevermindering optreedt. Deze volumeverandering die tijdens het stollen optreedt, wordt **slink** genoemd. Een zuiver metaal dat langzaam afkoelt, stolt in het ideale geval bij één temperatuur, de stollingstemperatuur (zie figuur 2.5). Alleen bij die temperatuur zijn vloeistof en vaste stof met elkaar in evenwicht. Tijdens het stollen blijft de temperatuur constant en komt er stollingswarmte vrij (net als bij ijs en water).

Bij het stollen vormen zich kleine kiemen van de vaste stof in de vloeistof, die vervolgens gaan groeien. Voor kiemvorming is onderkoeling nodig, dat wil zeggen dat de temperatuur iets beneden de stollingstemperatuur moet liggen om het stollen te laten beginnen. Bij een hoge afkoelsnelheid begint het stolproces pas bij sterke onderkoeling. Daardoor ont-



Figuur 2.5 Afkoelkromme van een zuiver metaal



Figuur 2.6 Gietstructuur van een gegoten blok voor een zuiver metaal (a) en voor een metaallegering (b). De foto (c) is van een zuiver metaal

staan veel kiemen tegelijkertijd, wat na het stollen in een fijnkorrelig materiaal resulteert. In het algemeen is dit gewenst, omdat een metaal met een fijnkorrelige structuur betere mechanische eigenschappen heeft dan dat met een grofkorrelige structuur.

Doordat de gietvorm koud is, treedt aan de rand van een gietstuk een hoge afkoelsnelheid op. Wanneer de gietvorm door het contact met het vloeibare metaal opwarmt, neemt de afkoelsnelheid af en ontstaan stengelvormige kristallen (deze groeien in de richting tegengesteld aan de warmtestroom). Figuur 2.6 laat een typische **gietstructuur** zien voor een zuiver metaal en voor een metaallegering. Bij het afkoelen van gietlegeringen verloopt de stolling vaak over een temperatuurtraject, omdat het basismetaal en de legeringselementen verschillende stollingstemperaturen hebben. Hierdoor blijft er in het midden een zone over waarin de kiemen in alle richtingen gelijkmatig uitgroeien (zie figuur 2.6b). Een gietstructuur heeft in het algemeen niet zulke goede eigenschappen (grofkristallijn, minder sterk, relatief bros).

Bij het stollen van een metaallegering verdelen de legeringselementen zich vaak niet gelijkmatig over het materiaal. Dit noemen we **segregatie**. In geval van kristalsegregatie is de samenstelling van de kern van het kristal anders dan aan het oppervlak. De mate van segregatie is afhankelijk van de afkoelsnelheid. Mede hierdoor worden de micro- en macrostructuur van een gietstuk, en dus ook de mechanische eigenschappen, beïnvloed door de snelheid waarmee het gietstuk tijdens en na het stollen afkoelt. Door een warmtebehandeling kan men een betere structuur verkrijgen, en daarmee betere mechanische eigenschappen. De eigenschappen van gietlegeringen (zie ook paragraaf 2.3) worden ook beïnvloed door de mogelijke aanwezigheid van **macro-** en **microporeusheid** als gevolg van een volumeafname tijdens de stolling.

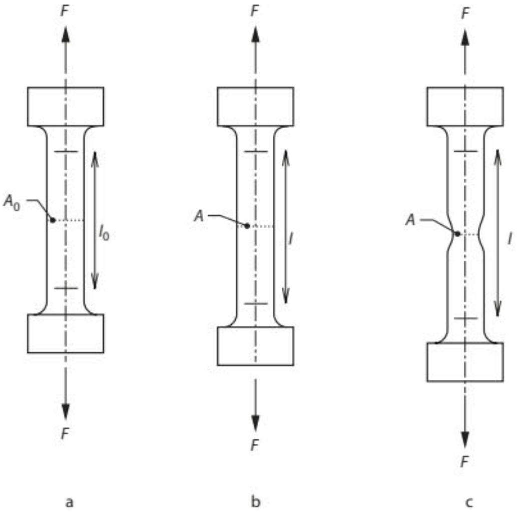
Wanneer metaallegeringen een plastisch deformatieproces ondergaan in een bepaald temperatuurgebied (in het algemeen beduidend hoger dan kamertemperatuur), ontstaat hierdoor een nieuwe kristalroosterstructuur. Hierbij worden de holtes (macro- en microporeusheid) gesloten en vindt een herverdeling van de gesegregeerde elementen plaats. Tijdens deze **rekristallisatie** vormt zich uit nieuwe kiemen een nieuw ongestoord rooster met weinig dislocaties. De effecten van versteviging worden hierdoor tenietgedaan. Bij een sterkere deformatie ontstaan er meer kiemen en krijgt het materiaal dus een fijnere structuur. Zo'n **kneedstructuur**, ook wel rekristallisatiestructuur genoemd, is veel regelmatiger en fijnkorreliger dan een gietstructuur. De mechanische eigenschappen van deze kneedlegeringen zijn dan ook beter dan die van gietlegeringen. Onder andere de sterkte en taaiheid zijn beter. Dit is ook de reden dat grote krukassen uit een kneedlegering worden gemaakt. Om op het vlak van sterkte te kunnen concurreren met kneedlegeringen bevatten gietlegeringen vaak een hoger percentage aan legeringselementen dan kneedlegeringen. Een kneedstructuur ontstaat bij omvormprocessen, zoals warmwalsen en smeden (zie hoofdstuk 4).

2.3 Mechanische eigenschappen van metalen

In deze paragraaf bespreken we een aantal mechanische eigenschappen van metalen. We kijken hiervoor achtereenvolgens naar de trekkromme, hardheid, versteviging, ductiliteit en de invloedsfactoren op het plastisch materiaalgedrag.

2.3.1 De trekkromme

De belangrijkste mechanische eigenschappen van metalen kunnen met behulp van een **trekproef** worden bepaald. Bij de uitvoering van een trekproef wordt een staaf met een cirkelvormige of rechthoekige doorsnede belast door twee tegengesteld gerichte, maar even grote, krachten *F* in de richting van de staaf (zie figuur 2.7). In beginsel wordt het



Figuur 2.7 Trekstaaf in uitgangstoestand (a), vóór insnoering (b) en vlak voor breuk (c)

verloop van de kracht *F* geregistreerd als functie van de verlenging Δl van de proefstaaf, uitgaande van een oorspronkelijke meetlengte l_0. Om het kracht-verlengingsdiagram minder afhankelijk te maken van de afmetingen van de staaf, worden de grootheden spanning en rek geïntroduceerd.

De **nominale spanning** σ_0 is de trekkracht *F* gedeeld door het oorspronkelijk doorsnedeoppervlak A_0 van de proefstaaf.

$$\sigma_0 = \frac{F}{A_0}$$

De **maatrek** ε wordt gedefinieerd als de verlenging Δl gedeeld door de oorspronkelijke meetlengte l_0.

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (\times 100\%)$$

Het verloop van de nominale spanning σ_0 als functie van de maatrek ε wordt de **trekkromme** genoemd en is in figuur 2.8 weergegeven.

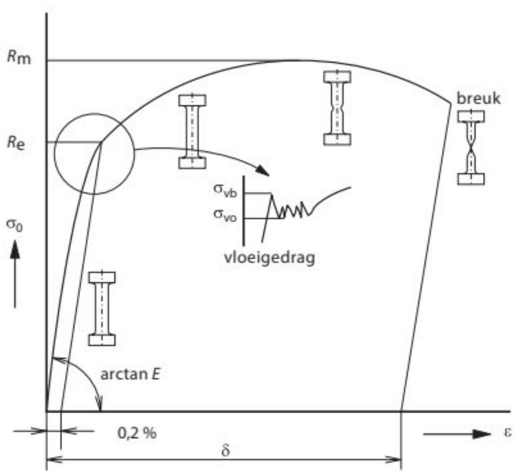
Indien men de belasting van nul af aan laat toenemen, wordt eerst het elastisch gebied van de trekkromme doorlopen. Dit betekent dat bij het wegnemen van de belasting de staaf zijn oorspronkelijke lengte weer aanneemt. Doorgaans verloopt in het elastische gebied de rek lineair met de spanning. Deze wetmatigheid staat alom bekend als de **wet van Hooke**:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \;\rightarrow\; \Delta l = \frac{F \times l_0}{E \times A_0}$$

De grootheid *E* in de formule is een materiaalconstante, die men de **elasticiteitsmodulus** noemt en die wordt uitgedrukt in MPa of N/mm^2. De richtingscoëfficiënt van de σ_0-ε-lijn in het elastische gebied wordt bepaald door de waarde van *E*. De **proportionaliteitsgrens** is het punt waarop van het lineaire verband tussen spanning en rek afgeweken gaat worden.

Als de belasting verder toeneemt, zullen op een gegeven moment ook plastische deformaties gaan optreden. Dit betekent dat na het wegnemen van de belasting een blijvende vervorming geconstateerd kan worden. De overgang tussen het elastische en het plastische gebied wordt gedefinieerd door de spanning die hoort bij de (zeer kleine) plastische deformatie van 0,2%. We noemen dit de 0,2%-**rekgrens** en deze spanning wordt met het symbool R_e aangeduid.

Sommige materialen vertonen een niet-continue overgang tussen het elastische en plastische gebied, zoals in figuur 2.8 is uitvergroot. Aan het einde van het elastische traject neemt de spanning plotseling af. Deze blijft enige tijd op en neer schommelen, waarna de trekkromme weer normaal doorlopen wordt. Men noemt dit **vloeigedrag**. De hoogste (nominale) spanning, welke tijdens het doorlopen van de trekkromme voor het eerst niet toeneemt, is de bovenste **vloeigrens** σ_{vb}. De onderste vloeigrens σ_{vo} is de laagste (nominale) spanning die tijdens het



Figuur 2.8 De trekkromme

vloeigedrag optreedt. De onderste vloeigrens wordt als de rekgrens R_e geïnterpreteerd.

De (nominale) spanning die hoort bij de maximale belasting F_{max} wordt de **treksterkte** R_m genoemd. Deze grootheid kan als volgt in formulevorm worden weergegeven:

$$R_m = \frac{F_{max}}{A_0}$$

In het gebied tussen de rekgrens en de treksterkte treedt gelijkmatige rek op; alle materiaaldeeltjes deformeren op dezelfde wijze. De proefstaaf wordt weliswaar langer en dunner, maar alle doorsneden blijven onderling in verhouding op een identieke wijze vervormen. Indien in het plastische gebied tussen R_e en R_m de belasting wordt weggenomen, veert het materiaal iets elastisch terug.

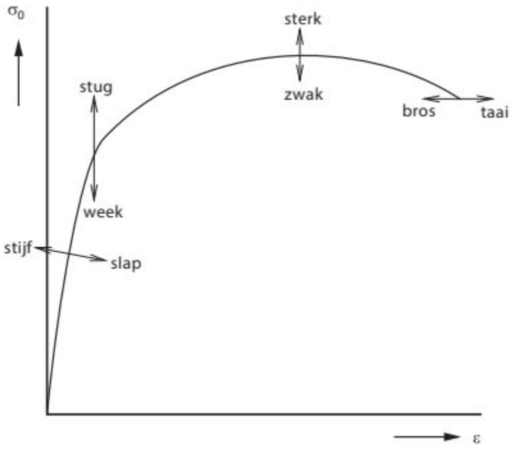
Na het bereiken van de maximale belasting gaat de staaf plaatselijk **insnoeren**. De proefstaaf wordt in de insnoerzone steeds dunner, terwijl het materiaal buiten de insnoerzone niet meer deformeert. Bij het doorlopen van de insnoerzone neemt de trekkracht af, totdat de proefstaaf op een gegeven moment breekt. Het vervormingsvermogen van het materiaal, of de ductiliteit, wordt gekarakteriseerd door de **breekrek** δ. Hieronder verstaan we de rek van de staaf gemeten na het breken, dus niet onder belasting, maar na elastische terugvering. Deze kan worden gemeten door de twee staafhelften passend in elkaar te leggen. De breekrek kan als volgt worden berekend:

$$\delta = \frac{l_{max} - l_0}{l_0} \ (\times 100\%)$$

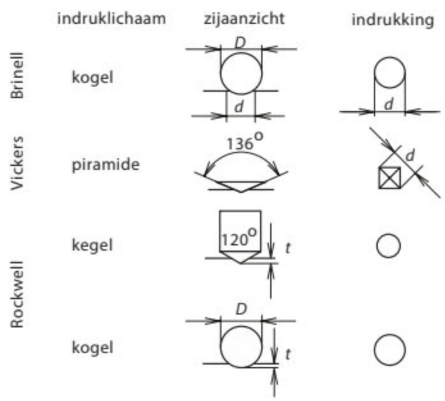
De rekgrens, treksterkte, elasticiteitsmodulus en breekrek zijn materiaalconstanten. De eigenschappen van een materiaal kunnen hiermee dus goed worden gekarakteriseerd. Als je materialen onderling wil vergelijken, dan geven de waarden van R_e, R_m, E en δ een aardige eerste indruk. Materialen met een hoge waarde van de rekgrens noemt men stug en met een relatief lage waarde week. Zo worden materialen met een hoge treksterkte als sterk omschreven, terwijl een materiaal met een geringe R_m zwak is. Een stijf materiaal kenmerkt zich door een hoge elasticiteitsmodulus en bij een geringe E spreekt men van een slap materiaal. Een grote breekrek is karakteristiek voor een taai materiaal. Bij een bros materiaal is δ relatief klein (zie figuur 2.9).

2.3.2 Hardheid

De **hardheid** is een mechanische eigenschap van een materiaal die niet met de trekproef bepaald wordt en die te maken heeft met slijtagebestendigheid. Onder andere van gereedschappen is de hardheid een belangrijk kenmerk. De hardheid van metalen is gedefinieerd als de weerstand tegen blijvende vervorming door indrukking. Als indruklichaam wordt een gehard stalen kogeltje (Brinell- en Rockwell-hardheid), een diamanten kegeltje (Rockwell-hardheid) of een diamanten piramidevormig indruklichaam (Vickers-hardheid) gebruikt (zie figuur 2.10). Bij een bepaalde belasting op het indruklichaam wordt de hardheid bepaald aan de



Figuur 2.9 Aanduiding mechanisch gedrag bij metalen



Figuur 2.10 Hardheidsmeetmethoden

hand van de grootte van de indrukking (Brinell en Vickers) of de indringdiepte (Rockwell). De hardheidswaarde van een materiaal wordt aangegeven met het symbool *H*, voorzien van één of meerdere indices die de meetmethode van de hardheid specificeren. Zo wordt de Vickers-hardheid met *HV* aangeduid. Een materiaal als diamant is zeer hard, terwijl zuiver koper vrij zacht is.

Er zijn verschillende manieren om ervoor te zorgen dat een werkstuk de gewenste hardheid krijgt:

- Warmtebehandeling. **Harden** is een warmtebehandeling van staal, waarbij na – vaak geforceerde – afkoeling een harde en brosse hardingsstructuur ontstaat (zie paragraaf 10.2.2). Door de structuur een tweede gloeibehandeling te laten ondergaan, wordt deze minder bros, waarmee de kans op hardingsscheuren vermindert. Men noemt dit **ontlaten**. In feite is het uitgangsmateriaal van bijvoorbeeld een boor relatief zacht en goed bewerkbaar. Na de warmtebehandelingen heeft een boor een sterk verhoogde hardheid. Voor verdere toepassingen verwijzen we naar de snijgereedschappen voor verspanende bewerkingen, die in hoofdstuk 5 worden behandeld.
- Materiaalkeuze. Bij metaallegeringen zorgen de legeringselementen in het algemeen voor een toename van de hardheid. Dit kan zowel door oplosharden (zie paragraaf 2.2.2) als door uitscheiding van een tweede fase, waardoor inwendige spanningen ontstaan en de hardheid toeneemt. In het geval van **snelstaal** (zie ook paragraaf 5.4), dat gelegeerd is met metalen zoals chroom en wolfram, scheiden tijdens het fabricageproces metaal-koolstofverbindingen zich uit. Deze metaalcarbiden zijn zeer hard en slijtvast, onafhankelijk van een eventuele warmtebehandeling. Door een warmtebehandeling kan ook de hardheid van de grondmassa aanzienlijk verhoogd worden. De vormgeving moet dan daarvoor plaatsvinden in ongeharde toestand.
- Deformatieproces. Deformatie van een metaal heeft bij kamertemperatuur versteviging tot gevolg, waardoor zowel de sterkte als de hardheid toenemen (zie paragraaf 2.2.1). Hiervan wordt bijvoorbeeld gebruikgemaakt bij het vervaardigen van staaldraad met een zeer aanzienlijke sterkte en hardheid, zoals pianodraad. Bij deformatie op verhoogde temperatuur is dit verstevigingsproces aanzienlijk minder of in het geheel niet aanwezig, afhankelijk van de temperatuur.

2.3.3 Versteviging

Voor sommige berekeningen zijn de nominale spanning en de maatrek niet geschikt. Dit geldt bijvoorbeeld voor berekeningen ten behoeve van de analyse van omvormprocessen. In dat geval worden de zogenaamde ware spanning en ware rek gebruikt. De **ware spanning** σ_w kun je vinden door de trekkracht *F* niet door het oorspronkelijke doorsnedeoppervlak A_0 te delen, maar door het werkelijke doorsnedeoppervlak *A* (zie figuur 2.7), dat met de belasting verandert.

$$\sigma_w = \frac{F}{A}$$

De **ware** of **natuurlijke rek** ε_w kunnen we als volgt wiskundig definiëren:

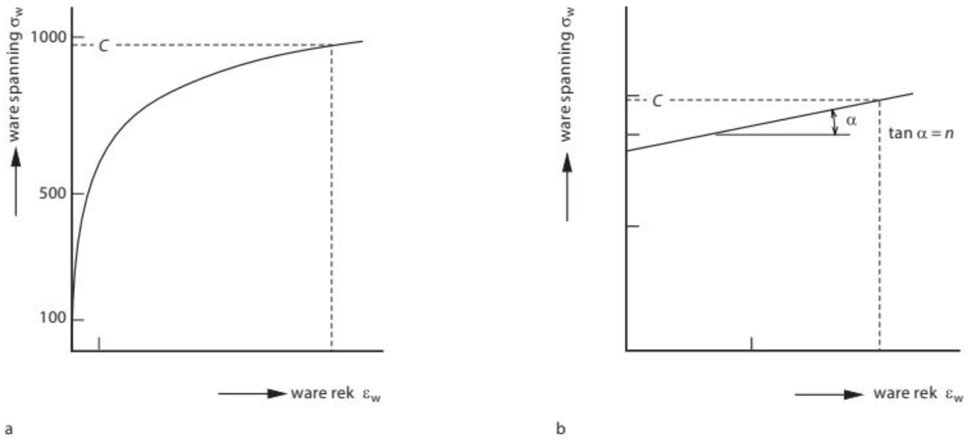
$$\varepsilon_w = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln\frac{l_1}{l_0}$$

In de formule stelt l_0 de oorspronkelijke lengte en l_1 de momentane lengte van het proefstuk voor. Een groot voordeel van de gebruikte rekdefinitie is dat de ware rekken, in tegenstelling tot de maatrekken, probleemloos op te tellen zijn. Omdat bij plastische deformatie van metalen het volume constant blijft, geldt dat de som van de ware rekken in drie onderling loodrechte richtingen gelijk is aan nul.

Bij de vervaardiging van een werkstuk door middel van een aantal deelbewerkingen kan de totale vervorming dus berekend worden door de deelrekken simpelweg bij elkaar op te tellen. Zo wordt de totale rek in een frisdrankblikje bepaald als de som van de rekken ten gevolge van het koudwalsen (zie paragraaf 4.4.1), het dieptrekken en de duntrekbewerkingen (zie paragraaf 4.5.4).

$$\varepsilon_{w,tot} = \varepsilon_{w,koudw} + \varepsilon_{w,dieptr} + \varepsilon_{w,duntr}$$

De **vloeispanning** σ_V is de ware spanning die bereikt moet worden om tot plastische deformatie te komen. Als gevolg van het verstevigingsgedrag neemt bij metalen in het algemeen de vloeispanning toe als de rek toeneemt. Als de ware spanning als functie van de ware rek ε_w wordt uitgezet, leidt dit tot de **verstevigingskromme** of **ware trekkromme** (zie figuur 2.11a). Voor uitgegloeide metalen kan de relatie tussen spanning en rek goed benaderd worden door de volgende exponentiële functie:



Figuur 2.11 De verstevigingskromme, op lineaire schaal (a) en op dubbellogarithmische schaal (b)

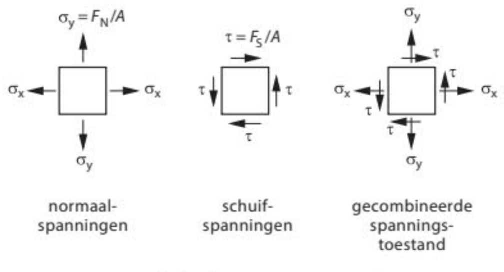
$$\sigma_V = C \times (\varepsilon_w)^n$$

In deze **verstevigingsfunctie** is *C* de **karakteristieke spanning**, in feite dus de spanning bij $\varepsilon_w = 1$, en *n* de **verstevigingsexponent**. De waarde van de verstevigingsexponent is bij de trekproef een maat voor de grootte van het gebied waarin uniforme deformatie (rek tot insnoering) optreedt, en in het algemeen een maat voor de omvormbaarheid.
De waarden van *C* en *n* kun je bepalen met behulp van een intermitterende trekproef. Daarvoor moet je in een aantal punten de krachten en lengte- of dikteveranderingen meten en deze omrekenen naar waarden voor de ware spanning en de ware rek. Wanneer je de gevonden waarden vervolgens uitzet in een grafiek op dubbellogaritmische schaal (zie figuur 2.11b), vind je de waarde van de verstevigingsexponent als de richtingscoëfficiënt van de rechte lijn, die zo goed mogelijk door de meetpunten gelegd is. De waarde van *C* kun je vinden door de waarde van een willekeurig punt op de rechte lijn in de formule in te vullen. Het is ook mogelijk om de waarden van *C* en *n* wiskundig te berekenen uit een aantal meetpunten.

De hiervoor besproken verstevigingskromme is met behulp van een trekproef bepaald, dat wil zeggen voor het geval van een éénassige spanningstoestand. Vaak worden werkstukken echter aan een samengestelde belasting onderworpen. Om de resultaten uit de trekproef universeel te kunnen gebruiken, is het noodzakelijk om een eenduidig verband tussen meer- en éénassige spanningstoestanden te kunnen leggen.

Voordat we dit verband leggen, zullen we eerst enkele begrippen uit de spanningsleer introduceren. Zoals figuur 2.12 laat zien, werkt een **normaalspanning** σ loodrecht op het beschouwde doorsnedeoppervlak. Deze is gelijk aan de normaalkracht F_N gedeeld door de grootte van het oppervlak *A*. Een **schuifspanning** τ werkt langs het beschouwde doorsnedeoppervlak en is gelijk aan het quotiënt van de schuifkracht F_S en de grootte van het oppervlak *A*. Vormgevingsprocessen zoals ponsen (zie paragraaf 7.1) en verspanen (zie hoofdstuk 5) vinden onder invloed van een schuifbelasting plaats.
Wanneer op een blokje materiaal zowel normaal- als schuifspanningen werken, kan door rotatie van het assenstelsel altijd een set onderling loodrechte vlakken gevonden worden die schuifspanningsvrij zijn. De hierop werkende normaalspanningen zijn de **hoofdspanningen** $(\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3)$ in drie onderling loodrechte richtingen. Voor de bepaling van de hoofdspanningen verwijzen we naar [2.6].

Bij een éénassige spanningstoestand, zoals bij de trekproef, kan het vloeigedrag van een metaal met de verstevigingsfunctie $\sigma = \sigma(\varepsilon_w)$ beschreven



Figuur 2.12 Verschillende spanningstoestanden

worden. In het geval van een meerassige spanningstoestand wordt het moment waarop het materiaal plastisch gaat deformeren bepaald door de verschillen tussen de drie hoofdspanningen. Maatgevend hierbij is de **effectieve spanning** $\bar{\sigma}$, een rekengrootheid representatief voor de optredende spanningstoestand. Deze kan als volgt in de hoofdspanningen (σ_1,σ_2,σ_3) worden uitgedrukt, zoals in [2.7] verder wordt toegelicht:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

Zodra de waarde van de effectieve spanning gelijk is aan die van de vloeispanning σ_V zal er plastische deformatie optreden. Het verloop van σ_V als functie van de rek ε (en daarmee het verloop van de verstevigingsfunctie) zal hierdoor echter niet veranderen. Bij een gestandaardiseerde temperatuur en snelheid kan het verstevigingsgedrag van een metaal dus door de *C*- en *n*-waarde van het materiaal worden gekarakteriseerd.

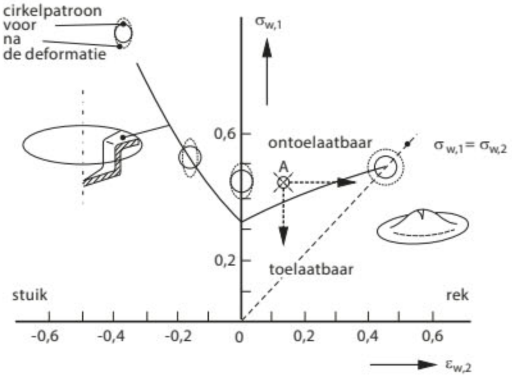
2.3.4 Ductiliteit

De weerstand tegen vervorming kan gezien worden als eerste kenmerk van de omvormbaarheid van metalen. Daarnaast moeten we kijken naar de hoeveelheid vervorming die het materiaal kan ondergaan totdat de samenhang verloren gaat. In de praktijk is dit in veel gevallen het belangrijkste kenmerk. We noemen dit de **ductiliteit** van het materiaal. De ductiliteit is niet zo eenvoudig uit te drukken. Naast het soort materiaal spelen verschillende andere factoren een rol, die allemaal samenhangen met de aard van de uit te voeren bewerking: onder andere de optredende rekken, de reksnelheden, de spanningen en de temperatuur. Het is het eenvoudigst om weer te beginnen met de éénassige spanningstoestand. Bij de trekproef begint na een bepaalde rek insnoering op te treden. Het maximum van de trekkracht wordt bereikt. In dit punt wordt het effect van de vermindering van de doorsnede ($dA<0$) juist gecompenseerd door het effect van de versteviging ($d\sigma>0$), zodat $dF = A \times d\sigma + \sigma \times dA = 0$. Nadat het beginpunt van **plastische instabiliteit** ($dF=0$) is bereikt, neemt de rek slechts plaatselijk toe op een in het algemeen onbeheerste wijze. De ware rek, behorend bij het punt waar de materiaalsamenhang verbroken wordt, noemt men de (ware) breekrek $\varepsilon_{w,b}$.

Bij omvormprocessen die onder invloed van trekspanningen verlopen is de versteviging essentieel. De versteviging zorgt immers voor het uitstellen van plastische instabiliteit. Zonder versteviging is onder trekbelasting maar een zeer geringe rek realiseerbaar. Bij een drukbelasting zal theoretisch geen plastische instabiliteit optreden. Bij een gecombineerde spanning heeft de gemiddelde spanning invloed op de ductiliteit (zie paragraaf 2.3.5); hoe lager de gemiddelde spanning, des te groter de ductiliteit zal zijn.
In het geval van scheidende en verspanende bewerkingen, waarbij de samenhang tussen materiaaldeeltjes bewust verbroken wordt, is het gunstig wanneer er snel plastische instabiliteit bereikt wordt en de breekrek gering is.
Behalve door de spanningstoestand wordt de ductiliteit vooral bepaald door de waarde van de verstevigingsexponent *n* en de voordeformatie van het materiaal. De voordeformatie is de vervorming die een materiaal in voorgaande processen heeft ondergaan. Zo is plaat in uitgegloeide toestand zachter en taaier dan koudgewalste plaat. De ductiliteit neemt toe met de *n*-waarde en af met de voordeformatie.

In het algemeen kunnen we stellen dat een bewerkingsproces plaatsvindt onder invloed van een bepaalde belasting en dat als gevolg van de bijbehorende spanningstoestand deformaties optreden. De invloed van het proces op de omvormbaarheid wordt bij plaat weergegeven door de **grensvervormingskromme** (zie figuur 2.13). De rekken $\varepsilon_{w,1}$ en $\varepsilon_{w,2}$ zijn werkzaam in het vlak van de plaat. Bedenk dat de rek $\varepsilon_{w,3}$ in de dikterichting van de plaat met $\varepsilon_{w,1}$ en $\varepsilon_{w,2}$ meeverandert, zodanig dat het totale volume constant blijft. In de grafiek is de grootste optredende (positieve) rek $\varepsilon_{w,1}$ uitgezet als functie van $\varepsilon_{w,2}$. De getekende lijnen in het diagram begrenzen het gebied waarin het proces als gevolg van insnoering instabiel en onbeheersbaar wordt, met breuk als gevolg. Voor verschillende plaatmaterialen, verstevigingsexponenten en voordeformaties gelden steeds andere krommen.

De grafiek laat zien dat de maximaal toelaatbare waarde voor $\varepsilon_{w,1}$ het kleinst is als $\varepsilon_{w,2} = 0$, en dat bij negatieve waarden van $\varepsilon_{w,2}$ de hoogste waarden voor $\varepsilon_{w,1}$ mogelijk zijn. Voor plaatmateriaal met een lagere verstevigingsexponent of een grotere voordeformatie verschuiven de lijnen in de grafiek naar beneden. Als tijdens de productie scheurvorming optreedt, die door een proef bijvoorbeeld in punt A



Figuur 2.13 De grensvervormingskromme

wordt gelokaliseerd (zie figuur 2.13), dient een van de volgende maatregelen overwogen te worden:
- de rek $\varepsilon_{w,2}$ vergroten, bijvoorbeeld door beter klemmen in die richting;
- het product herontwerpen, zodanig dat $\varepsilon_{w,1}$ kleiner wordt;
- de smering verbeteren om de rekken zich beter te laten verdelen;
- het toepassen van een materiaal met een grotere verstevigingsexponent of een geringere voordeformatie.

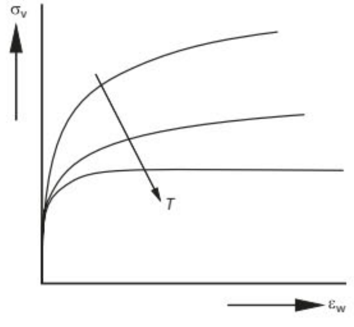
2.3.5 Invloedsfactoren op het plastisch materiaalgedrag

De vloeispanning van een metaal is niet alleen afhankelijk van de mate van vervorming, maar ook van de temperatuur, de reksnelheid, de kristalgrootte, een eventuele voorkeursoriëntatie van kristallen (anisotropie) en de spanningstoestand. Wanneer van een materiaal met voordeformatie wordt uitgegaan, zal de vloeispanning op het moment dat een bewerkingsproces begint groter zijn dan bij hetzelfde materiaal in uitgegloeide toestand. Door natuurlijke rekken te gebruiken kunnen de rekken van verschillende deelbewerkingen, inclusief die van de voordeformatie, eenvoudig bij elkaar opgeteld worden. In de praktijk geeft men plaatstaal vaak een voordeformatie van enkele procenten door het koud te walsen, om zodoende vloeigedrag van het materiaal (zie figuur 2.8) tijdens de vervolgbewerking te vermijden. Dit resulteert in een betere (gladdere) oppervlaktekwaliteit van het uit de plaat gevormde product.

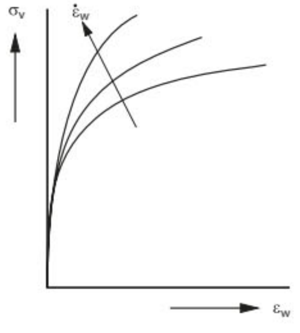
Invloed van de temperatuur

Bij een verhoging van de temperatuur verandert in eerste instantie de kristalstructuur van het materiaal (nog) niet, maar verplaatsen de dislocaties zich gemakkelijker vanwege het hogere energieniveau. Hierdoor neemt de vormveranderingsweerstand af en de breekrek toe. De vloeispanning zal dus afnemen bij een toename van de temperatuur (zie figuur 2.14). Sommige staalsoorten (vooral bij een laag koolstofpercentage) vormen hierop een uitzondering in het temperatuurgebied van kamertemperatuur tot ca. 200 °C.

Wanneer de temperatuur nog verder wordt verhoogd, zal bij een temperatuur $T = 0{,}6 \times T_{sm}$ (60% van de smelttemperatuur in Kelvin) rekristallisatie beginnen op te treden. Boven een bepaalde drempelwaarde in de deformatie zullen de gedeformeerde kristallen worden omgezet in nieuwe kristallen, waarvan de eigenschappen ongeveer gelijk zijn aan die van het niet-vervormde materiaal (zie paragraaf 2.2.3). Het effect van de versteviging verdwijnt dus



Figuur 2.14 Invloed van de temperatuur op de verstevigingskromme



Figuur 2.15 Invloed van de reksnelheid op de verstevigingskromme

door rekristallisatie, wat grote vervormingen mogelijk maakt. Hiervan wordt bij processen als smeden en warmwalsen gebruikgemaakt.

Invloed van de reksnelheid

De **reksnelheid** of **deformatiesnelheid** $\dot{\varepsilon}_w = \dfrac{d\varepsilon_w}{dt}$

is gedefinieerd als de verandering van de rek per tijdseenheid. Daarom drukken we deze uit in s^{-1}. De invloed van de reksnelheid kan in de verstevigingsfunctie worden meegenomen door hier een correctiefactor voor de reksnelheid aan toe te voegen. Een verhoging van de reksnelheid leidt meestal tot een toename van de vloeispanning (zie figuur 2.15).

De reksnelheidsgevoeligheid is in de eerste plaats afhankelijk van de materiaalsoort. Er zijn materialen waarbij de vloeispanning niet door de reksnelheid wordt beïnvloed. De invloed van de reksnelheid, met name op de waarde van de rekgrens R_e, kan echter ook tientallen procenten bedragen. Realiseer je hierbij wel dat het dan om grote reksnelheidsverschillen gaat. Een trekproef wordt doorgaans met 10^{-3} s^{-1} uitgevoerd, de meeste omvormprocessen met 10 – 100 s^{-1} en verspanende bewerkingen vaak met > 1000 s^{-1}. Bij het ontwerp van de kreukelzone van een auto kan hier dankbaar gebruik van gemaakt worden.
Bij een verhoging van de bewerkingstemperatuur neemt de reksnelheidsgevoeligheid toe. Bij processen die boven de rekristallisatietemperatuur worden uitgevoerd, zoals smeden en warmwalsen, is de invloed van de reksnelheid in verhouding het grootst.

Een grote reksnelheidsgevoeligheid is ook kenmerkend voor **superplastische materialen**. Dit zijn overwegend zeer fijnkristallijne aluminium- en titaanlegeringen. Deze groep materialen vertoont de bijzondere eigenschap dat in de trekproef – en tijdens bewerkingen met een vergelijkbare spanningstoestand – zeer grote vervormingen bereikt kunnen worden zonder dat insnoering optreedt. Je kunt hierbij denken aan hoe kauwgom zich gedraagt.
In de praktijk kan men met dergelijke materialen complex gevormde werkstukken vaak in één fabricagestap vervaardigen. Voorwaarde is wel dat het vormgevingsproces plaatsvindt bij een voldoende lage reksnelheid (gewoonlijk in de orde van 10^{-3} s^{-1}) en een verhoogde temperatuur (ca. 900 °C). Dit betekent dat superplastische materialen ongeschikt zijn voor massafabricage. Ze worden dan ook alleen gebruikt in de kleinseriefabricage, zoals in de vliegtuigindustrie.

Een bijzonder verschijnsel kan optreden bij zeer snelle vervorming van metalen. Als de afname van de vloeispanning veroorzaakt door een temperatuursverhoging groter wordt dan de toename veroorzaakt door versteviging, dan treedt er een concentratie van deformatie op. Dit uit zich in een niet-homogene deformatie van het werkstuk. Dit verschijnsel noemen we **thermische instabiliteit** en kan optreden bij het verspanen van sommige metalen.

Invloed van de kristalgrootte

Materialen met een geringe kristalgrootte hebben in het algemeen een hogere vloeispanning en een grotere plastische rek tot breuk dan vergelijkbare grofkristallijne materialen, zoals we in paragraaf 2.2.2 nader hebben toegelicht.

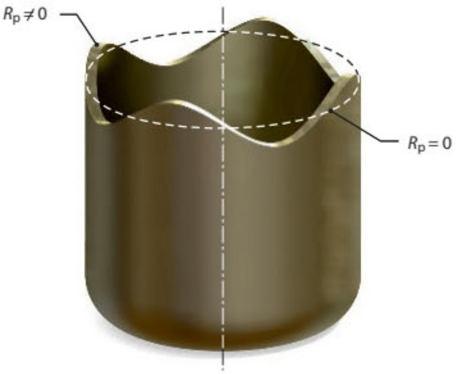
Invloed van een richtingsafhankelijke kristaloriëntatie

Wanneer de kristallen in een polykristallijn materiaal niet willekeurig georiënteerd zijn, maar bijvoorbeeld als gevolg van walsen een voorkeursoriëntatie hebben, dan zullen ook de mechanische eigenschappen van het materiaal richtingsafhankelijk zijn. Dit geldt zowel voor de weerstand tegen vervorming als voor de maximaal haalbare rek. Deze richtingsafhankelijkheid van eigenschappen als gevolg van een productieproces wordt anisotropie genoemd (zie paragraaf 2.2.1). In de praktijk speelt het vooral een rol bij plaatmateriaal, het resulteert dan in voorkeursrichtingen na het walsen. Men bepaalt de mate van anisotropie met enkele trekproeven en drukt deze uit in de **anisotropiefactor** R_α. Dit is de verhoudingsfactor tussen de ware rek in de breedterichting ($\varepsilon_{w,br}$) en de dikterichting ($\varepsilon_{w,dik}$) van de proefstaaf:

$$R_\alpha = \frac{\varepsilon_{w,br}}{\varepsilon_{w,dik}} = \frac{\ln(b/b_0)}{\ln(s/s_0)}$$

Het is gebruikelijk om de anisotropiefactor R_α te bepalen in de walsrichting (R_0), onder 45° met de walsrichting (R_{45}) en onder 90° met de walsrichting (R_{90}).
De **normaalanisotropie** R_n is het gemiddelde van deze waarden en wordt als volgt gedefinieerd:

$$R_n = \frac{R_0 + 2 \times R_{45} + R_{90}}{4}$$



Figuur 2.16 Oorvorming

Bij een $R_n > 1$ zal het materiaal in het vlak van de plaat gemakkelijker vervormen dan in dikterichting, wat gunstig is bij processen als dieptrekken (zie paragraaf 4.5.4).

De **planaire anisotropie** R_p karakteriseert de verschillen tussen R_0, R_{45} en R_{90}, in formulevorm als volgt weergegeven:

$$R_p = \frac{R_0 - 2 \times R_{45} + R_{90}}{2}$$

Het dieptrekken van plaat (zie paragraaf 4.5.4) met planaire anisotropie ($R_p \neq 0$) leidt tot oorvorming (zie figuur 2.16).

Invloed van de spanningstoestand

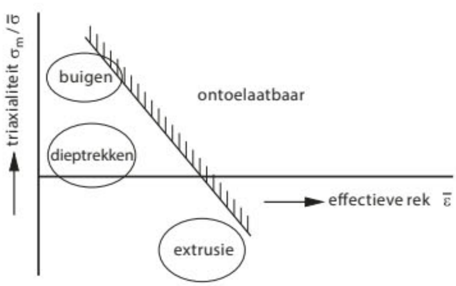
De spanningstoestand heeft invloed op de vervormingsmogelijkheden van een materiaal. Maatgevend hiervoor is de **gemiddelde** of **isostatische spanning** σ_m, die als volgt in drie onderling loodrechte spanningen (σ_x, σ_y, σ_z) kan worden uitgedrukt:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}$$

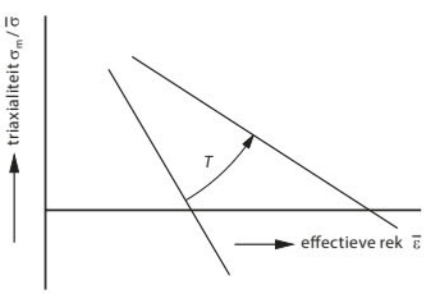
Door een verlaging van de gemiddelde spanning, dat wil zeggen door in verhouding de bijdrage van de drukcomponenten te vergroten ten opzichte van die van de trekcomponenten, kan de plastische rek van een materiaal vergroot worden. De verhouding tussen de gemiddelde spanning σ_m en de effectieve spanning $\bar{\sigma}$ wordt de **triaxialiteit** genoemd.

De geschiktheid van een materiaal voor een bepaald bewerkingsproces kan worden beoordeeld aan de hand van het **ductiliteitsdiagram**. In dit diagram is langs de verticale as de triaxialiteit uitgezet, en langs de horizontale as de effectieve rek (zie figuur 2.17). De effectieve rek is een grootheid die karakteristiek is voor de optredende deformaties. De **ductiliteitsgrens** in het diagram geeft de begrenzing van de vervormingsmogelijkheden van een materiaal weer als functie van de triaxialiteit. In figuur 2.17 is voor enkele processen aangegeven waar deze in het ductiliteitsdiagram gelegen zijn.

Tijdens processen waarbij de triaxialiteit van het proces en de maximale rek links van de ductiliteitsgrens liggen, zal het materiaal niet bezwijken. Als het procespunt zich rechts van de ductiliteitsgrens bevindt, is de vereiste vervorming niet haalbaar, omdat bij het overschrijden van de ductiliteitsgrens de samenhang in het materiaal verloren gaat.
Het grote voordeel van een dergelijke materiaalkarakterisering is dat je vooraf kan bepalen of een gegeven materiaal geschikt is voor het gekozen proces. De triaxialiteit en de optredende maximale rek van een gekozen proces moeten dan uiteraard wel bekend zijn.



Figuur 2.17 Het ductiliteitsdiagram



Figuur 2.18 Invloed van de temperatuur op de ligging van de ductiliteitsgrens

Het gedrag van een materiaal zoals vastgelegd in het ductiliteitsdiagram is in feite onafhankelijk van het gekozen vormgevingsproces. Dieptrekken en hulsextrusie (zie paragraaf 4.5.4 en 4.4.2) zijn beide processen om bekervormige producten te vervaardigen. Uit figuur 2.17 blijkt echter dat bij hulsextrusie grotere vervormingen mogelijk zijn.

In figuur 2.18 is de invloed van de temperatuur op de ligging van de ductiliteitsgrens schematisch weergegeven. In het algemeen zal de ductiliteit geen lineair gedrag vertonen met de temperatuur.

2.4 Kunststoffen

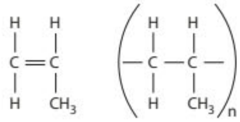
Kunststoffen zijn kunstmatig vervaardigde materialen die zich kenmerken door extreem grote moleculen, doorgaans macromoleculen genoemd. In de volksmond wordt vaak van 'plastics' gesproken, omdat een grote groep kunststoffen (thermoplasten) bij verwarming heel gemakkelijk vervormt. Hiervan wordt gebruikgemaakt bij de vormgevingsprocessen die we nog zullen bespreken.

De toepassing van kunststoffen heeft de afgelopen decennia een steeds grotere vlucht genomen. Metalen componenten zijn in toenemende mate door kunststof onderdelen vervangen. Bekijk zelf maar eens hoeveel onderdelen van een moderne auto uit kunststof zijn vervaardigd.

Voordelen van kunststoffen zijn vooral de lage dichtheid (circa 1 kg/dm^3), de bestendigheid tegen corrosie en chemicaliën, de geringe elektrische en thermische geleidbaarheid, de geluidsdemping en het gemak waarmee voor een relatief gunstige prijs gekleurde of transparante werkstukken vervaardigd kunnen worden. Daar staat tegenover dat de stijfheid en sterkte vaak relatief gering zijn en dat het toepassingsgebied qua temperatuur beperkt blijft. Een nadeel is ook dat kunststoffen in het algemeen moeilijker recyclebaar zijn dan metalen.

2.4.1 Opbouw van kunststoffen

Kunststoffen zijn in feite **polymeren** vermengd met **toevoegingen**. Polymeren zijn macromoleculen die door middel van een polymerisatieproces uit **monomeren** worden verkregen. Monomeren kunnen dan ook beschouwd worden als de bouwstenen waaruit een polymeer is opgebouwd. Verreweg de meeste



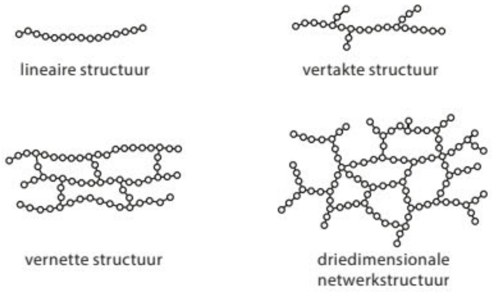
Figuur 2.19 Opbouw van polypropeen

monomeren zijn koolwaterstoffen. In figuur 2.19 wordt dit geïllustreerd voor polypropeen (PP). De dubbele binding van het monomeer propeen wordt onder invloed van temperatuur en druk tijdens het polymerisatieproces opengebroken, waarna door chemische binding het macromolecuul polypropeen ontstaat. In feite worden n monomeren (bijvoorbeeld $n = 100.000$) verbonden tot een lang, ketenvormig macromolecuul. De grootte hiervan kan worden uitgedrukt in het moleculair gewicht of in de polymerisatiegraad, een getal dat overeenkomt met het aantal monomeren n in een molecuul.

Toevoegingen worden gebruikt om de eigenschappen van een polymeer, zoals de stijfheid, sterkte, kleur, verwerkbaarheid, weerbestendigheid, brandeigenschappen, elektrische geleiding enzovoort, te verbeteren. Zo worden weekmakers gebruikt om een kunststof zachter en flexibeler te maken. Vulmiddelen, zoals houtmeel en kalk, verbeteren de sterkte en de hardheid, en zorgen bovendien voor een gunstigere kiloprijs. De eigenschappen van veel kunststoffen worden negatief beïnvloed door ultraviolette straling (zonlicht), wat verbeterd kan worden door roet toe te voegen. Een groot voordeel van kunststoffen is dat het uitgangsmateriaal met kleurstoffen in iedere gewenste kleur kan worden samengesteld. Smeermiddelen worden vaak toegevoegd om wrijving tijdens vormgevingsprocessen te verminderen en te vermijden dat werkstukken in het gereedschap blijven vastzitten.

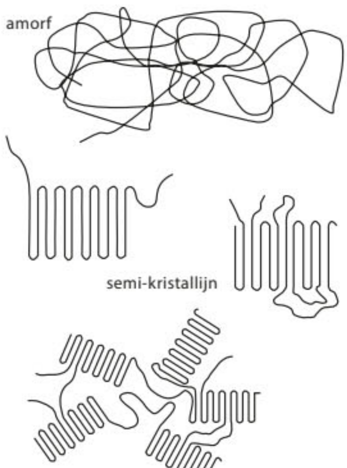
2.4.2 Structuur van kunststoffen

De meest gehanteerde indeling van kunststoffen in thermoplasten, thermoharders en elastomeren is gebaseerd op de structuur van de macromoleculen. In figuur 2.20 vind je een schematisch overzicht van de gangbare structuurvormen, te weten een **lineaire structuur**, een **vertakte structuur**, een **vernette structuur** en een **netwerkstructuur**. Naast copolymeren met samengestelde macromoleculen bespreken we in deze paragraaf kort enkele nieuwe(re) ontwikkelingen, zoals bioplastics en biologisch afbreekbare kunststoffen.



Figuur 2.20 Schematisch overzicht van polymeerstructuren

Kenmerkend voor **thermoplasten** is dat ze boven een bepaalde temperatuur gemakkelijk plastisch deformeren en bij verdere temperatuursverhoging verweken. Dit proces is omkeerbaar. In het gebied van plastische deformatie vervormen weliswaar de macromoleculen zelf, maar blijven ze ten opzichte van elkaar dezelfde positie innemen. Bij het verweken gaan de macromoleculen ten opzichte van elkaar verschuiven. Het moge duidelijk zijn dat dit gedrag alleen mogelijk is bij lineaire en vertakte polymeerketens. Bij vertakte polymeren zullen de molecuulketens minder gemakkelijk ten opzichte van elkaar vervormen en verplaatsen dan bij lineaire polymeren, met als gevolg dat de weerstand tegen deformatie groter is. Voorbeelden van lineaire polymeren zijn hoge dichtheid polyetheen (HDPE) en PVC. Voorbeelden van vertakte polymeren zijn lage dichtheid polyetheen (LDPE) en polystyreen (PS).



Figuur 2.21 Amorfe en semikristallijne polymeren

Bij **thermoharders** ontstaat tijdens het polymerisatieproces een driedimensionale netwerkstructuur. Als gevolg hiervan zullen thermoharders in het algemeen sterker, stijver, harder en brosser zijn dan thermoplasten en een betere vormstabiliteit hebben. Ook treedt bij temperatuursverhoging geen verweking op, maar zal het materiaal uiteindelijk gaan ontleden. Dit heeft belangrijke consequenties voor de vormgevingsprocessen waarmee producten uit een thermoharder gemaakt kunnen worden. Veel toegepaste thermoharders zijn fenolen en epoxyharsen.

Elastomeren of **kunstrubbers** hebben een vernette structuur. Deze ontstaat door **vulkanisatie**. Op relatief grote afstand van elkaar worden dwarsverbindingen gevormd tussen de macromoleculen. Dit vulkanisatieproces vindt plaats bij een hogere temperatuur en druk onder toevoeging van zwavel. Hierdoor krijgen deze materialen een uitgesproken elastisch gedrag en verweken ze niet.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen **amorfe** en **(semi)kristallijne kunststoffen**. Bij een amorfe polymeer liggen de macromoleculen willekeurig door elkaar heen en ontbreekt iedere ordening (zie figuur 2.21). Volledig kristallijne kunststoffen komen vanwege de lengte van de macromoleculen niet voor, maar er bestaan wel structuren met kristallijne zones waarin de molecuulketens systematisch geordend zijn. Semikristallijne polymeren zijn dus ook plaatselijk amorf. De maximaal haalbare **kristalliniteit** is 95%. Zo'n hoge kristalliniteit zien we onder andere bij hoge dichtheid polyetheen (HDPE).

De kristalliniteit heeft een duidelijke invloed op de materiaaleigenschappen. Bij een toename van de kristalliniteit wordt het materiaal stijver, harder en brosser. De dichtheid neemt toe, en daarmee de warmtebestendigheid en de bestendigheid tegen chemische oplosmiddelen. Alleen kunststoffen met een volledig amorfe structuur, zoals polycarbonaat en acryl, kunnen volkomen transparant zijn. Dit gegeven speelt een belangrijke rol bij de vervaardiging van (contact)lenzen.

Bij **copolymeren** zijn de macromoleculen uit meerdere typen monomeren samengesteld, waardoor verbeterde eigenschappen kunnen worden verkregen. **Thermoplastische elastomeren (TPE)** zijn copolymeren die zich rond kamertemperatuur elastisch gedragen, na verhitting week worden en gemakkelijk een andere vorm aannemen, en na

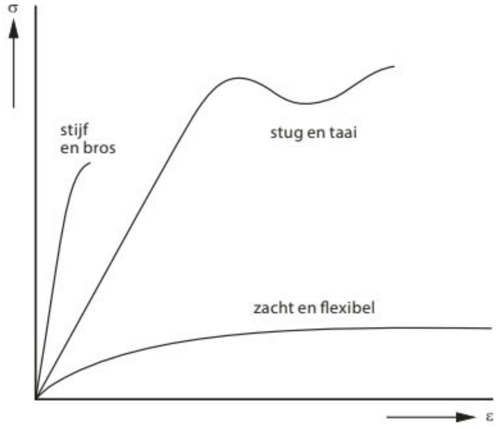
afkoeling weer elastisch worden, waarbij de nieuwe vorm behouden blijft. Echte elastomeren hebben chemische dwarsverbindingen tussen de polymeerketens, maar thermoplastische elastomeren hebben bij lagere temperaturen fysische verbindingen, die bij hogere temperaturen verdwijnen.

'Biobased' kunststoffen, meestal **bioplastics** genaamd, zijn opgebouwd uit hernieuwbare grondstoffen. Denk aan grondstoffen als zetmeel, suiker, cellulose en eiwitten, bijvoorbeeld afkomstig uit mais, suikerbiet, hout, aardappel of zeewier. Deze kunststoffen zijn CO_2-neutraal, maar vaak niet biologisch afbreekbaar of composteerbaar. Voorbeelden zijn Bio-PE en Bio-PET.

Biologisch afbreekbare kunststoffen zijn kunststoffen die biologisch door micro-organismen kunnen worden afgebroken of worden gecomposteerd bij een temperatuur van ca. 70 °C. Meestal zijn dit bioplastics. Deze kunststoffen hebben kortere polymeerketens en zijn in het algemeen poreuzer en vochtgevoeliger dan andere kunststoffen. Het afbreken ervan duurt enkele maanden, terwijl de traditionele kunststoffen tientallen jaren nodig hebben om in de natuur volledig af te breken. Voorbeelden van biologisch afbreekbare kunststoffen zijn polylactic acid (PLA) en polybutylene succinate (PBS).

2.4.3 Gedrag van kunststoffen

Het is niet verwonderlijk dat een grote variëteit aan kunststoffen ook tot een grote variëteit aan eigenschappen leidt. Figuur 2.22 laat drie karakteristieke trekkrommen van kunststoffen bij kamertemperatuur zien, één voor zachte en gemakkelijk vervormbare thermoplasten, één voor vrij stugge maar taaie thermoplasten en de laatste voor stijve en brosse thermoharders. In vergelijking met metalen zijn thermoplasten in het algemeen gevoeliger voor temperatuur- en tijdsafhankelijke invloeden. Thermoplasten vertonen – ook bij kamertemperatuur – typisch tijdsafhankelijk gedrag in de vorm van **kruip** (een met de tijd veranderende deformatie bij een constante belasting) en **spanningsrelaxatie** (een met de tijd veranderende spanning bij een constante vervorming). Voor gedetailleerdere informatie over de eigenschappen van kunststoffen wordt verwezen naar [2.8]. Figuur 2.23 geeft een overzicht van de eigenschappen en toepassingen van een aantal veel toegepaste kunststoffen.
Voor de beschrijving van het gedrag van thermoplasten in de productie is vooral het verloop van de elasticiteitsmodulus als functie van de temperatuur relevant. In figuur 2.24 is dit verloop schematisch weergegeven. In dit diagram zijn drie gebieden te onderscheiden. Bij relatief lage temperaturen bevinden thermoplasten zich in de vaste toestand of **glastoestand**. Ze zijn dan hard en bros.



Figuur 2.22 Karakteristieke trekkrommen van kunststoffen

Bij verhoging van temperatuur gaat het materiaal over in de plastische toestand of **rubbertoestand**. Voor amorfe thermoplasten vindt deze overgang plaats bij de zogenaamde **glastemperatuur** T_g, waarbij ook een verandering van het specifieke volume optreedt. In feite betreft het hier een overgangsgebied. De ligging hiervan wordt bepaald door de opwarmsnelheid. Bij thermoplasten met een hoge kristalliniteit is de overgangszone tussen de glas- en rubbertoestand in verhouding veel groter. Bij verschillende kunststoffen, waaronder polyetheen en kunstrubbers, is de glastemperatuur overigens beduidend lager dan 0 °C.

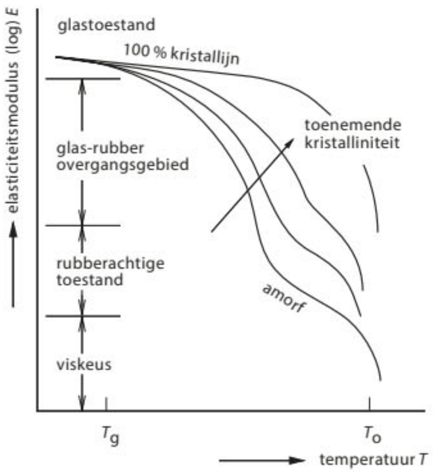
Wanneer thermoplasten vanuit het rubbergebied nog verder verwarmd worden, gaan ze op een gegeven moment over in de vloeibare of **viskeuze toestand**. Ze vertonen zogeheten visco-elastisch gedrag. In deze toestand is de **viscositeit** of stroperigheid van de smelt de belangrijkste grootheid voor de bewerking. Gesmolten kunststof gedraagt zich veel stroperiger dan water of een gesmolten metaal. De viscositeit van een gesmolten thermoplast ligt een factor 100 tot 1000 hoger dan die van een metaal.

Thermoharders, die door polymerisatie gevormd zijn, hebben nog wel een glastemperatuur T_g, maar

Naam		Eigenschappen	Toepassing
Thermoplasten			
PE HDPE	polyetheen hoge dichtheid	k; zeer taai, lage *E*, licht, grote krimp HDPE sterker, goedkoop	verpakking (ook onder 0 °C), emmers, kratten, flessen
PP	polypropeen	k; taai, licht, grote krimp, goedkoop	kratten, scharnieren, auto-industrie, vezels, hard schuim
PVC	polyvinylchloride	hard: a; zonder weekmaker, sterk, bros, goedkoop zacht: a; met weekmaker, taai, grote kruip, goedkoop	dakgoten, rioolpijpen, gevelpanelen, flessen, folie, kleding, slangen
PS	polystyreen	a; hard, stijf en bros, goedkoop	dekoratie, koffiebekers, TL-balken, piepschuim
ABS	acrylonitril- butadieen-styreen	a; stijf, hard en relatief taai, krasvast, verchroombaar	constructiemateriaal, behuizing van telefoons, auto-industrie, speelgoed
PMMA	polymethyl-metacrylaat (plexiglas)	a; stijf, hard, bros en sterk, krasvast, optisch hoogwaardig	baden, verlichting, lichtreclames, veiligheidsglas
PA	polyamide (nylon)	k; taai, sterk en slijtvast, goede lagereigenschappen	tandwielen, lagers, auto-industrie, (textiel)vezels
PTFE	polytetrafluoretheen (teflon)	k; zacht, geringe sterkte, zwaar, goede lagereigenschappen, grote krimp, neiging tot kruip, groot gebruikstemperatuursgebied	afdichtingen, isolatiefolie, geneeskunde (hartklep, bloedvat), chemische industrie
Thermoharders			
PF	fenolformaldehyde (bakeliet)	stijf, bros en hard, temperatuurbestendig	elektrotechniek, gelamineerde plaat, knoppen, handgrepen
EP	epoxyhars	taai, hoge *E*, sterk en hard, slijt- en maatvast, duur	elektrotechniek, isolatoren, ski's, (giet) matrijzen, lakken en lijmen
UP	polyesterhars	hoge *E* en sterk (met korte glasvezels), slijtagebestendig, lage wrijving	boten, autocarrosserieën, koffers, impregneren kleding en papier
Elastomeren			
PUR	polyurethaan	zacht, trekvast, hoge *E*, slijtagebestendig, zon-, oxidatie- en warmtebestendig	(tand)riemen, schoenen, schuimen

Afkortingen: a = amorf; k = kristallijn; *E* = elasticiteitsmodulus

Figuur 2.23 Overzicht van de eigenschappen en toepassingen van een aantal kunststoffen



Figuur 2.24 Elasticiteitsmodulus *E* als functie van de temperatuur bij thermoplasten

kunnen door verhitting niet meer in de rubbertoestand of viskeuze toestand gebracht worden.

2.4.4 Vervaardiging van producten uit kunststof

Thermoplasten worden door de materiaalproducent in de vorm van granulaat (zie figuur 2.25) of poeder aan de kunststofverwerkende industrie geleverd. In feite vinden alle primaire vormgevingsprocessen van thermoplasten in de viskeuze toestand plaats. Daarom behandelen we ze in het hoofdstuk over oervormen (hoofdstuk 3). Dit betekent dat het uitgangsmateriaal eerst moet worden verwarmd. Daarna vindt de vormgeving plaats. Na afkoeling krijgt het product de gewenste sterkte en stijfheid. De productiecyclus bestaat dus altijd uit opwarmen, vormgeven en afkoelen. De relatief slechte warmtegeleiding van polymeren heeft een negatieve invloed op de cyclustijd. Wanneer een thermoplastisch halffabri-



Figuur 2.25 Kunststofgranulaat (Shutterstock)

caat, zoals buis of plaat, tot in het rubbergebied wordt verwarmd, is het materiaal week genoeg om dit te vervormen en behoudt het na afkoeling de aangebrachte vorm. Processen die in de rubbertoestand worden uitgevoerd, komen in het hoofdstuk over omvormen (hoofdstuk 4) aan de orde.

Bij thermoharders wordt van een nog niet uitgeharde grondstof uitgegaan. Vaak wordt deze als vloeibare pasta aangeleverd, zoals giet- en impregneerharsen. Door een chemische reactie met een harder krijgt het product bij het uitharden zijn eindvorm. Elastomeren moeten gezien worden als thermoplasten die direct na het vormgevingsproces door vulkanisatie een vernette structuur krijgen. In figuur 2.26 vind je een overzicht van de typen vervaardigingstechnieken die met metalen, thermoplasten, thermoharders en elastomeren worden uitgevoerd.

2.5 Keramische materialen

Metalen en kunststoffen zijn niet geschikt voor alle technische toepassingen. Soms worden er hoge eisen gesteld aan de sterkte bij hoge temperatuur, de hardheid, de weerstand tegen slijtage en/of corrosie, de chemische bestendigheid en een zeer geringe thermische en/of elektrische geleidbaarheid. Vaak hebben **keramische materialen** dan betere eigenschappen. Deze materialen bestaan uit keramische korrels die met of zonder gebruik van een bindmiddel een onderling hechte binding vormen. De korrels zijn chemische verbindingen van metalen (aluminium, wolfram, titanium, zirconium) of niet-metalen (silicium) enerzijds, en zuurstof (oxiden), stikstof (nitriden) of koolstof (carbiden) anderzijds. Keramische producten van aardewerk en porselein worden al eeuwen vervaardigd. In de techniek worden keramische materialen veel toegepast in gereedschappen voor verspanende bewerkingen. Je vindt ze terug als snijmateriaal in de vorm van snijplaatjes (zie paragraaf 5.4), bijvoorbeeld voor het uitvoeren van het draaiproces, of in de vorm van slijpkorrels, waaruit bijvoorbeeld slijpstenen zijn opgebouwd (zie paragraaf 5.10).

In deze paragraaf bespreken we de volgende keramische materialen: aluminiumoxide, carbiden en nitriden.

Aluminiumoxide (Al_2O_3) heeft een relatief grote hardheid, een matige sterkte, een hoge warmvastheid en kan een aanzienlijke temperatuur (tot circa 1500 °C) verdragen. Het wordt toegepast in snijplatjes (witte keramiek), geschikt voor hoge snijsnelheden, en als slijpmateriaal.

De belangrijkste **carbiden** zijn wolframcarbide (WC), titaniumcarbide (TiC), siliciumcarbide (SiC) en boriumcarbide (BC). Het veel als snijmateriaal toegepaste **hardmetaal** (zie paragraaf 5.4) bestaat uit metaalcarbiden zoals WC en TiC, waarbij kobalt als bindmiddel tussen de slijtagebestendige bestanddelen fungeert. De carbiden WC en TiC zijn globaal even hard als Al_2O_3, maar sterker. Aluminiumoxide

Werkstukmateriaal	Type vervaardigingstechniek (hoofdgroep)					
	Oervormen	Omvormen	Verspanen	Scheiden	Verbinden	
					Lassen	Lijmen
Metalen	XX	XX	XX	XX	XX	X
Thermoplasten	XX	XX	X	X	X	XX
Thermoharders	XX	–	X	X	–	X
Elastomeren	XX	–	–	(X)	–	X

XX = Algemeen toegepast X = Beperkt toegepast (X) = Zeer beperkt toegepast – = Niet toepasbaar

Figuur 2.26 Overzicht van de typen vervaardigingstechnieken toepasbaar voor metalen en kunststoffen

gemengd met titaniumcarbide wordt ook als keramisch beitelmateriaal (zwarte keramiek) in beitelplaatjes toegepast. **Siliciumcarbide** kenmerkt zich door een goede bestendigheid tegen slijtage en corrosie, een lage wrijvingscoëfficiënt en een hoge warmvastheid; SiC wordt gebruikt als slijpmateriaal.

Van de **nitriden** worden vooral polykristallijn kubisch boriumnitride (PCBN) en titaniumnitride (TiN) in de verspaning toegepast. Polykristallijn kubisch boriumnitride is na diamant het hardste materiaal. Het is dus zeer slijtvast en bovendien bestand tegen hoge temperaturen (tot circa 1800 °C). Het materiaal komt niet in de natuur voor en moet dus synthetisch vervaardigd worden. Het wordt toegepast in beitelplaatjes, als slijpkorrel en ook als coating. Titaniumnitride heeft zeer gunstige wrijvingseigenschappen en wordt daarom als coating gebruikt op snijgereedschappen om de levensduur te verhogen.

2.6 Composieten

Een **composiet** moet gezien worden als een combinatie van ten minste twee wezenlijk verschillende bestanddelen die herkenbaar aanwezig zijn in het materiaal, ieder een eigen functie hebben en een combinatie van eigenschappen mogelijk maken, superieur aan die van de afzonderlijke bestanddelen. Een composiet bestaat uit een grondmassa versterkt met een 'wapening'. Voorbeelden zijn gedroogde klei met stro versterkt, gewapend beton, kunststoffen met glasvezelwapening en moderne composieten met een metalen of keramische grondmassa. Zo is hardmetaal, geïntroduceerd in paragraaf 2.5, een composiet bestaande uit harde metaalcarbiden in een grondmassa van kobalt. In deze paragraaf kijken we verder alleen naar vezelversterkte kunststoffen.

De **vezels** in vezelversterkte kunststoffen hebben in vergelijking met de grondmassa grote sterkte en stijfheid in de vezelrichting, maar niet loodrecht op de vezelrichting. Veel toegepaste vezelmaterialen zijn glasvezel, koolstof en aramide. Aramide, vaak beter bekend onder handelsnamen als Twaron en Kevlar, is een sterk gedeformeerde polymeer met een stijfheid ($E \approx 100$–120 GPa) en sterkte groter dan die van staal en een relatief lage soortelijke massa (circa 1/5 van die van staal). Ook een combinatie van deze vezelmaterialen is mogelijk: in tennisrackets past men dikwijls een combinatie van glasvezel en koolstofvezel toe. Bij vezelversterkte kunststoffen bestaat 10% tot 60% van het volume uit vezels. Omdat de vezelrichting meestal niet willekeurig georiënteerd is, zullen composieten in het algemeen anisotrope eigenschappen hebben.

Als **grondmassa** wordt in de meeste gevallen een thermoharder gebruikt, zoals een epoxyhars of polyesterhars. Thermoplasten worden tegenwoordig in toenemende mate met een vezelversterking toegepast, bijvoorbeeld in de vliegtuigindustrie. De verwerking is dan veel goedkoper en ze zijn veel beter bestand tegen kerfwerking. Het impregneren gaat echter moeilijker.

De vezels kunnen op verschillende wijzen in de grondmassa worden opgenomen, en wel in de vorm van:
- losse korte of lange vezels. De vezels hebben dan in het algemeen een diameter van circa 0,01 mm. Bij korte vezels ligt de lengte/diameterverhouding tussen 20 en 60, bij lange vezels tussen 200 en 500.
- draden (roving). Het draadmateriaal zal dan tijdens het productieproces van een spoel moeten worden afgewikkeld.
- weefsel, met een structuur als die van textiel.
- matjes geperst van ononderbroken of afgekorte vezels, met een min of meer willekeurige vezeloriëntatie in het vlak van de mat.

Bij de vervaardiging van producten uit vezelversterkte kunststof wordt vaak gebruikgemaakt van een uitgangsmateriaal waarbij de vezels reeds vooraf met een thermoharderhars zijn geïmpregneerd. In het Engels worden deze uitgangsmaterialen vaak aangeduid als '**prepregs**'. Bij een zogenaamde **sheet-moulding compound (SMC)** gaat het om een opgerold halffabricaat in de vorm van strip, bestaande uit een mengsel van vezels en thermoharderhars, die tussen twee dunne kunststoffen folielagen is aangebracht. Afhankelijk van de productgeometrie kan als uitgangsmateriaal ook een **bulk-moulding compound (BMC)** gebruikt worden, vervaardigd door een mengsel van thermoharderhars met vezels in de vorm van een streng te extruderen en vervolgens op de gewenste lengte af te korten. Een **thick-moulding compound (TMC)** combineert de voordelen van een SMC en een BMC, en wordt verkregen door het spuitgieten van een mengsel van thermoharderhars en in lengte variërende vezels.

Het polymerisatieproces (hardingsproces) zal pas na de vormgeving van het product onder geconditioneerde omstandigheden qua temperatuur en vochtigheid mogen plaatsvinden. Sheet-moulding, bulk-moulding en thick-moulding compound zullen daarom bij een voldoende lage temperatuur moeten worden opgeslagen. De toelaatbare opslagtijd, meestal aangeduid als '**pot life**', is sterk afhankelijk van de chemische samenstelling, maar ligt doorgaans rond enkele weken.

2.7 Overige materialen

Glas bestaat uit een mengsel van oxiden, waarvan tenminste 50% siliciumdioxide. Opmerkelijk is dat glas in vaste toestand een amorfe structuur heeft, te beschouwen als een vloeistofstructuur, die door zeer snelle afkoeling is 'ingevroren'. Aan deze structuur dankt glas zijn goede transparante eigenschappen. Ook verschillende thermoplasten hebben een amorfe structuur (zie paragraaf 2.4.2). Hoewel er een grote variëteit aan glassoorten bestaat, kenmerkt glas zich in het algemeen door bros gedrag, een geringe warmtegeleiding, een hoge weerstand tegen elektrische geleiding en een goede bestendigheid tegen corrosie en chemicaliën. Technische toepassingen van glas zijn bijvoorbeeld te vinden in verlichting, lcd-displays, kathodestraalbuizen, vezeloptiek en glasvezelversterking in composieten (zie paragraaf 2.6).

Grafiet is een kristallijne vorm van koolstof en heeft door z'n gelaagde structuur een lage wrijvingscoëfficiënt. Hoewel grafiet bros is, kenmerkt het materiaal zich ook door een uitstekende elektrische en warmtegeleiding, een goede warmteschokbestendigheid en een oxidatiebestendigheid tot circa 500 °C. Dit maakt het materiaal geschikt als elektrodemateriaal voor vonkerosie (zie paragraaf 6.2.2).

Diamant is een andere vorm van koolstof met een andere kristalroosterstructuur dan grafiet. Het is het hardste bekende materiaal, is bros en heeft een goede druksterkte en stijfheid. De beperkte stabiliteit begrenst de toelaatbare temperatuur echter tot 600-700 °C. Omdat natuurlijke diamant in grotere afmetingen uiterst schaars is, wordt veel diamant voor industrieel gebruik synthetisch vervaardigd. Diamant wordt in monokristallijne vorm, dus als eenkristal, toegepast, maar veel vaker in polykristallijne vorm, waarbij de diamanten kristalletjes op een onderlaag zijn aangebracht. De belangrijkste toepassing als snijmateriaal vindt men in het nabewerken van non-ferrometalen zoals koper, messing en aluminium, maar diamant wordt ook als slijpmateriaal gebruikt.

Samenvatting

Het gedrag van metalen wordt in belangrijke mate bepaald door het kristalrooster van het materiaal en de grootte en regelmatigheid van de kristallen (gietstructuur of kneedstructuur). Kenmerkend voor metalen is versteviging; doordat bij voortschrijdende plastische deformatie lopende dislocaties elkaar steeds meer gaan hinderen en moeizaam over kristalgrenzen heen kunnen lopen, neemt de weerstand tegen vervorming toe.

De belangrijkste mechanische eigenschappen van een metaal zijn de rekgrens, de treksterkte, de elasticiteitsmodulus en de breekrek, die met behulp van een trekproef bepaald worden. De hardheid wordt gedefinieerd als de weerstand tegen blijvende vervorming door indrukking en is een maat voor de slijtagebestendigheid.

Het plastisch gedrag van een metaal laat zich goed beschrijven door de verstevigingsfunctie. De verstevigingsfunctie geeft het verband weer tussen de ware spanning en de ware rek. Het plastisch materiaalgedrag wordt beïnvloed door de temperatuur, de reksnelheid, de kristalgrootte, de kristaloriëntatie en de spanningstoestand.

Kunststoffen zijn polymeren vermengd met toevoegingen. Thermoplasten hebben een lineaire of vertakte structuur, thermoharders een netwerkstructuur en elastomeren een vernette structuur. Het gedrag van thermoplasten wordt in belangrijke mate bepaald door het feit of het materiaal zich in de glastoestand, de rubbertoestand of de viskeuze toestand bevindt. Daarnaast speelt de kristalliniteit een rol.

Keramische materialen zijn uit korrels van metaalcarbiden, aluminiumoxide, boriumnitride of titaniumnitride samengesteld. Vanwege hun slijtagebestendigheid en warmtehardheid worden deze materialen als gereedschapsmateriaal voor verspaning toegepast.

Composieten bestaan uit twee wezenlijk verschillende bestanddelen en kunnen gezien worden als een grondmassa versterkt met een ‘wapening’. Bij vezelversterkte kunststoffen worden glasvezel, koolstof en aramide als vezelmateriaal toegepast.

Glas heeft dankzij een amorfe structuur goede transparante eigenschappen. Grafiet is een kristallijne vorm van koolstof met een uitstekende elektrische en warmtegeleiding, en is daardoor een geschikt elektrodemateriaal. Diamant is het hardste materiaal dat bekend is. Het wordt zowel in monokristallijne als in polykristallijne vorm als snijmateriaal toegepast.

Literatuur

2.1 Kalpakjian S., Schmid S.R., *Manufacturing Engineering and Technology*, 7th SI edition, Pearson, 2014, ISBN 978-981-06-9406-7. Hoofdstuk 1 'The structure of metals'; hoofdstuk 2 'Mechanical behaviour, testing and manufacturing properties of materials'; hoofdstuk 7 'Polymers: Structure, general properties and applications'; hoofdstuk 8 'Ceramics, glass, graphite, diamond and nanomaterials': Structure, general properties and applications'; hoofdstuk 9 'Composite materials: Structure, general properties and applications'.

2.2 Groover M.P., *Principles of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems*, 5th SI edition, Wiley, 2013, ISBN 978-1-118-47420-4. Hoofdstuk 2 'The nature of materials'; hoofdstuk 3 'Mechanical properties of materials'; hoofdstuk 5 'Engineering materials'.

2.3 Callister W.D.,Rethwish D.G., *Materials Science and Engineering: an Introduction*, 9th SI edition, Wiley, 2014, ISBN 978-1-118-31992-4.

2.4 Mourik P. van, Dam J. van, *Materiaalkunde voor ontwerpers en constructeurs*, heruitgave, VSSD Delft, 2012, ISBN 978-9-065-62305-8.

2.5 Budinski K.G., Budinski M.K., bewerking Wei W., *Materiaalkunde*, 9de editie, Pearson Benelux, 2014, ISBN 978-9-043-02613-0.

2.6 Hibbeler R.C., *Statics and Mechanics of Materials*, 4th SI edition, Pearson, 2014, ISBN 978-9-814-52604-3. Hoofdstuk 14 'Stress and strain transformation'.

2.7 Hosford F.H., Caddell R.M., *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*, 4th edition, Cambridge University Press, 2014, ISBN 978-1-107-67096-9. Hoofdstuk 1 'Stress and strain'; hoofdstuk 2 'Plasticity'; hoofdstuk 3 'Strain hardening'; hoofdstuk 4 'Plastic instability'; hoofdstuk 5 'Temperature and strain-rate dependence'.

2.8 Vegt A.K. van der, Govaert L.E., *Polymeren: van keten tot kunststof*, VSSD Delft, 2005, ISBN 978-90-71301-48-3.

2.9 Young R.J., Lovell P.A., *Introduction to Polymers*, 3rd edition, CRC Press, 2011, ISBN 978-0-84-933929-5.

2.10 Osswald T.A., Menges G., *Materials Science of Polymers for Engineers*, 3rd edition, Carl Hanser Verlag, 2012, ISBN 978-1-56990-514-2.

Symbolenlijst

Indices:

max	=	maximaal
0	=	oorspronkelijke grootheid
1	=	grootheid na deformatie
1,2,3	=	in de richting 1, 2 respectievelijk 3
x,y,z	=	in de richting x, y respectievelijk z

Symbolen:

A	=	Oppervlak, doorsnede-oppervlak	[mm^2]
b	=	Breedte	[mm]
C	=	Karakteristieke spanning	[MPa]
E	=	Elasticiteitsmodulus	[MPa]
F	=	(Trek)kracht	[N]
F_N	=	Normaalkracht	[N]
F_S	=	Schuifkracht	[N]
H	=	Hardheid	[-]
HV	=	Vickers hardheid	[-]
l	=	Lengte	[mm]
n	=	Verstevigingsexponent	[-]
R_e	=	Rekgrens	[MPa]
R_m	=	Treksterkte	[MPa]
R_n	=	Normaalanisotropie	[-]
R_p	=	Planaire anisotropie	[-]
R_α	=	Anisotropiefactor	[-]
R_0	=	Anisotropiefactor in de walsrichting	[-]
R_{45}	=	Anisotropiefactor onder 45° met de walsrichting	[-]
R_{90}	=	Anisotropiefactor loodrecht op de walsrichting	[-]
s	=	Materiaaldikte	[mm]
t	=	Tijd	[s]
T	=	Temperatuur	[K]
T_g	=	Glastemperatuur	[°C]
T_{sm}	=	Smelttemperatuur	[K]
δ	=	Breekrek	[-]
Δl	=	Verlenging	[mm]
ε	=	Maatrek	[-]
ε_w	=	Ware of natuurlijke rek	[-]
$\varepsilon_{w,b}$	=	(Ware) breekrek	[-]
$\varepsilon_{w,br}$	=	Ware rek in breedterichting	[-]
$\varepsilon_{w,dik}$	=	Ware rek in dikterichting	[-]
$\varepsilon_{w,tot}$	=	Totale ware rek	[-]
$\dot{\varepsilon}_w$	=	Reksnelheid	[s^{-1}]
$\bar{\varepsilon}$	=	Effectieve rek	[-]
σ	=	Spanning, normaalspanning	[MPa]
σ_m	=	Gemiddelde of isostatische spanning	[MPa]
σ_V	=	Vloeispanning	[MPa]
σ_{vb}	=	Bovenste vloeigrens	[MPa]
σ_{vo}	=	Onderste vloeigrens	[MPa]
σ_w	=	Ware spanning	[MPa]
σ_1	=	Hoofdspanning in richting 1	[MPa]
σ_2	=	Hoofdspanning in richting 2	[MPa]
σ_3	=	Hoofdspanning in richting 3	[MPa]
$\bar{\sigma}$	=	Effectieve spanning	[MPa]
τ	=	Schuifspanning	[MPa]

Oefenvragen

2.1 Licht toe wat onder versteviging van een metaal verstaan wordt en verklaar dit verschijnsel.

2.2 Een halffabricaat met een gietstructuur wordt bij hogere temperatuur omgevormd. Welke invloed heeft rekristallisatie van een metaal op de structuur en eigenschappen?

2.3 Een halffabricaat met een kneedstructuur is bij kamertemperatuur eerst sterk vervormd en wordt vervolgens tot boven de rekristallisatietemperatuur verhit. Welke invloed heeft rekristallisatie van een metaal op de structuur en eigenschappen?

2.4 Waarom is de rekgrens van een materiaal gedefinieerd als de (nominale) spanning bij een plastische deformatie van 0,2%?

2.5 Waarom treedt bij een plastisch omvormproces met metalen nooit slechts in één richting vervorming op?

2.6 Geef het essentiële verschil aan tussen de grensvervormingskromme en het ductiliteitsdiagram.

2.7 Waarom zijn de verschillen in de stijfheid van kunststoffen bij kamertemperatuur zo groot?

2.8 Vergelijk de materiaalstructuur van een amorfe thermoplast, een semikristallijne thermoplast, een elastomeer, een thermoplastische elastomeer en een thermoharder.

2.9 Verklaar waarom keramische materialen onder druk een hogere belasting kunnen opnemen dan onder trek.

2.10 Wat is een 'prepreg'? Noem een voor- en nadeel van het werken met 'prepregs'. Noem twee voorbeelden van 'prepregs' die als halffabricaten verwerkt worden.

inclusief website!

Op www.industrieleproductie.nl vind je de antwoorden op deze vragen, maar ook extra studie- en oefenmateriaal, zoals video's en meer opgaven.

3 Oervormen

In dit hoofdstuk geven we een beschrijving van de principes van de vloeibare vormgeving, het gieten, de vormgeving van kunststoffen in viskeuze toestand en van de poedermetallurgie.
We behandelen de belangrijkste technieken voor het gieten van metalen, de vormgevingstechnieken voor kunststoffen in viskeuze toestand en het sinteren van metalen. We geven regels voor de vormgeving van producten die met deze processen worden vervaardigd.
We geven tot slot ook richtlijnen voor het kiezen van het gunstigste gietproces.

3.1 Grondslagen van het oervormen

Oervormen omvat technieken waarbij voorwerpen worden vervaardigd uit vormloos materiaal (vloeistoffen, poeders, pasta's, vezels, folies of mengsels daarvan). Door afkoeling of een ander chemisch of fysisch proces gaan deze materialen over in vaste materialen.
De geometrie van het product ontstaat meestal door een vormdragend gereedschap: gereedschap dat specifiek is voor het te vervaardigen product. In de meeste gevallen omsluit dit gereedschap het gehele product. Bijvoorbeeld bij gietvormen en bij matrijzen voor het persen van poeders. In andere gevallen bepaalt het gereedschap slechts de geometrie van één zijde van het product. Bijvoorbeeld bij de vervaardiging van voorwerpen uit vezelversterkte kunststoffen. Daarbij worden glasvezelmatten met vloeibare kunststof geïmpregneerd en op een mal gelegd. Door polymerisatie harden deze matten vervolgens uit.



Figuur 3.1 Gietijzeren leeuw uit China (954-959 n.C., 6 m hoog en 5,4 m lang)

Oervormen behoort tot de oudste vormgevingstechnieken in de historie van de mensheid. Denk hierbij bijvoorbeeld aan het vervaardigen van bouwelementen uit leem en klei, eventueel vermengd met stro of ander plantaardig materiaal. Ook het gieten van metalen is een bijzonder oude techniek en wordt vanaf circa 4000 v.C. toegepast.
In dit hoofdstuk besteden we aandacht aan de vloeibare vormgeving van metalen (gieten), de vloeibare vormgeving van kunststoffen en de vormgeving van poeders van metalen (sinteren). Voorwerpen van composietmaterialen kunnen vrijwel uitsluitend door oervormtechnieken worden vervaardigd. Hierdoor is de aandacht voor het oervormen aan het einde van de 20e eeuw sterk toegenomen. De omzet van het gieten van metalen is de laatste decennia afgenomen, maar lijkt zich nu te stabiliseren. Strikt genomen behoren de materiaalaangroeitechnieken die we in hoofdstuk 8 behandelen ook tot het oervormen. Bij deze technieken worden de producten echter totaal anders uit het materiaal opgebouwd dan bij de klassieke oervormprocessen. Er zijn bovendien geen productgebonden gereedschappen bij nodig.

3.2 Inleiding gieten

Al zo'n 6000 jaar beoefent de mensheid het **gieten**: het vervaardigen van voorwerpen via vloeibare vormgeving. In diverse musea vind je allerlei gouden, zilveren, bronzen, tinnen en ijzeren voorwerpen terug. Niet alleen kleine gebruiksvoorwerpen, maar ook voorwerpen met een gewicht van enige tonnen (zie figuur 3.1).



Figuur 3.2 Gegoten Romeinse munt (a) met gietvorm (b) 350 v.C.

Een gietstuk wordt gemaakt door middel van een afdruk van het product in een vorm. In de oudheid maakte men hiervoor gebruik van verschillende soorten vormmateriaal. Men vervaardigde eenmalige vormen van zand, maar ook permanente vormen van steen voor seriefabricage van wapens en andere voorwerpen (zie figuur 3.2). Naast deze twee methoden beheerste men ook de verloren-wasmodelmethode (zie paragraaf 3.6).

Deze oude vormgevingstechnieken worden tegenwoordig nog altijd gebruikt voor het vervaardigen van gegoten producten. Gieten is niet alleen een vervaardigingsproces uit het grijze verleden, maar ook een springlevende techniek voor het maken van hoogwaardige producten. Hierbij geldt een enorme vormvrijheid. Zeker als je gieten vergelijkt met het vervaardigen van producten met behulp van omvormtechnieken of verspanende bewerkingen.



Figuur 3.3 Aluminium behuizing van een vliegwiel, in zand gegoten (MGG Netherlands)

In figuur 3.3 zie je de behuizing van het vliegwiel van een vrachtwagenmotor. Een dergelijk product is alleen door gieten in seriefabricage te vervaardigen.

3.3 Kenmerken van het gietproces en de gietstukken

Een metalen product of een onderdeel ervan kan op een groot aantal manieren worden vervaardigd. Gieten is in veel gevallen de kortste weg tussen uitgangsmateriaal en product.

Vaak kan na het gieten worden volstaan met een beperkte mate van nabewerking, meestal door verspanen. Dit is afhankelijk van de gekozen gietmethode en van de gevraagde toleranties en oppervlaktekwaliteit. Vaak blijft de nabewerking ook beperkt tot het verwijderen van bramen op het productoppervlak.

Gietstukken hebben een gietstructuur. Het ontstaan hiervan hebben we in paragraaf 2.2.3 toegelicht. Ook hebben we daar verklaard waarom de mechanische eigenschappen van gietlegeringen in het algemeen minder goed zijn dan die van kneedlegeringen.

Speciale gietlegeringen

Naast de traditionele gietlegeringen zijn in de afgelopen jaren speciale gietlegeringen ontwikkeld. De producten die daarvan worden gemaakt, kunnen qua sterkte en taaiheid concurreren met kneedlegeringen. Tegenwoordig zijn alle krukassen in personenauto's bijvoorbeeld gemaakt uit nodulair gietijzer (zie figuur 3.4). Dit materiaal heeft een mechanische sterkte en taaiheid vergelijkbaar met smeedstaal en heeft daarnaast betere dempings- en noodloopeigen-



Figuur 3.4 Gegoten krukas van nodulair gietijzer (FAW)

Type legering	Treksterkte (MPa)	Rek bij breuk (%)	Toepassingen en specifieke eigenschappen
lamellair gietijzer	150 - 400	0,6 - 0,75	machineframes, fittings, motorblokken, uitstekende giet- en dempingseigenschappen
nodulair gietijzer	350 - 900	2 - 22	landbouwmachine-onderdelen, motoren, hogere taaiheid dan lamellair gietijzer
gietstaal	430 - 1200	6 - 22	turbinehuizen, pompen
messing	170 - 600	10 - 45	kleppen, fittings, scheepsschroeven
brons	160 - 330	2 - 12	tandwielen, lagers, goede corrosie-eigenschappen
Al-zandgietlegeringen	120 - 300	1 - 8	breed toepassingsgebied, meest toegepast: AlSi12

Figuur 3.5 Overzicht en eigenschappen van een aantal gietlegeringen

schappen (het vermogen om na het wegvallen van de olietoevoer te blijven functioneren).

We hebben in dit boek niet de ruimte om uitvoerig in te gaan op de eigenschappen van de gangbare gietlegeringen. In figuur 3.5 vind je wel een overzicht van de eigenschappen en toepassingen van een beperkt aantal gietlegeringen.

Vrijheid van vormgeving

Gieten biedt de grootste vrijheid in vormgeving van alle vervaardigingstechnieken. Krommingen in het oppervlak, zoals zadelcontouren en holle ruimtes in het gietstuk, kunnen op eenvoudige wijze worden gerealiseerd. De kenmerkende hoekige vorm van producten, opgebouwd uit halffabricaten, is bij gietstukken meestal afwezig. Met weinig moeite kunnen vloeiende materiaalovergangen worden gerealiseerd, die een fraai ogend product opleveren. Bij een gietstuk kan de wanddikte aangepast worden aan de plaatselijke mechanische belasting, zodat overdimensionering op minder hoog belaste plaatsen voorkomen kan worden. Dit leidt tot gewichtsbesparing in vergelijking met een gelaste constructie, zelfs wanneer de sterkte van de gietlegering lager is dan die van de kneedlegering. Gieten wordt ook veelvuldig toegepast voor producten met een complexe geometrie. Deze zijn met andere vormgevingstechnieken slechts met veel moeite te realiseren. Een beperking van de vloeibare vormgeving is dat er minimaal een bepaalde wanddikte moet worden gegoten. Deze is afhankelijk van de gietlegering, de gietmethode en de afmetingen van het product (zie paragraaf 3.8).

Seriegrootte

Het vervaardigen van producten door gieten wordt slechts toegepast bij een bepaalde seriegrootte. De seriegrootte is afhankelijk van de gebruikte methode en de geometrie van het product. Voor spuitgieten bedraagt het minimum aantal gietstukken bijvoorbeeld enige duizenden stuks. Bij zandgieten is ook enkelstukfabricage mogelijk, vooral bij grote, complexe delen of bij vervanging van kapotte onderdelen.

Kwaliteitsbeheersing

Bij het vervaardigen van producten door middel van gieten moet rekening gehouden worden met een zeer groot aantal variabelen, die elk op de een of andere wijze invloed hebben op de kwaliteit van het gietstuk. Deze variabelen zijn zowel vormgerelateerd als materiaalgerelateerd. Het vereist veel kennis en ervaring om de juiste gietmethode te kiezen. Men moet rekening houden met de samenstelling van de gietlegering op het ogenblik van gieten (zolang het materiaal vloeibaar is verandert de samenstelling voortdurend), de giettemperatuur en de afkoelsnelheid. Soms kunnen de juiste gietparameters alleen door experimenteren worden gevonden. Tegenwoordig maakt men steeds vaker gebruik van computerprogramma's waarmee het gietproces kan worden gesimuleerd om de juiste gietparameters vast te stellen (zie ook figuur 3.41). Als de juiste gietparameters eenmaal zijn gevonden, dan dient men die ook zorgvuldig te reproduceren om te grote onderlinge verschillen tussen identieke gietstukken te voorkomen.

3.4 Indeling gietmethoden naar de aard van het vormmateriaal

Om een gietstuk te kunnen maken moet eerst in zand of in metaal een **vormholte** (gietvorm) gemaakt worden. Deze is het negatief van het product dat vervaardigd moet worden. Na het vullen van de vormholte met het vloeibare metaal en de stolling daarvan, kan het gietstuk uit de **gietvorm** worden genomen als het voldoende is afgekoeld.

Er zijn verschillende gietvormen, afhankelijk van het materiaal waarin de vormholte wordt gerealiseerd:
- **Eenmalige gietvormen**; deze vormen gaan na het gieten verloren en moeten voor elk volgend gietstuk opnieuw worden vervaardigd. Deze vormen worden gebruikt bij gieten in zand en bij de verloren-modelmethode.
- **Permanente gietvormen**; bij coquillegieten en spuitgieten wordt gebruikgemaakt van een metalen vorm, een **matrijs**.

Bij vormen in zand gaat men meestal uit van een **model** van hout of kunststof, een replica (positieve afbeelding) van het gietstuk. Hout en kunststof zijn beide uitstekend verspanend te bewerken. Een complex model kan gemakkelijk worden opgebouwd uit eenvoudige onderdelen die met elkaar verlijmd worden. Het fabriceren van een metalen model is lastiger en daardoor duurder. Metalen modellen slijten echter minder dan modellen van hout of kunststof en worden daarom toegepast bij grotere productaantallen.

Het maken van een model uit hout, metaal of kunststof kost veel tijd en geld. Dit past niet goed meer bij het huidige streven om nieuw ontwikkelde producten snel op de markt te brengen. Om tijd te besparen, maakt men tegenwoordig veelvuldig gebruik van CAD/CAM-technieken (zie paragraaf 13.7.3). Gieterijen maken ook steeds vaker gebruik van materiaalaangroeitechnieken voor de vervaardiging van modellen (zie hoofdstuk 8). Deze modellen zijn niet zo duurzaam als de modellen die op klassieke wijze vervaardigd zijn, maar voor kleinere series is dat niet zo'n bezwaar.

Tegenwoordig worden digitale productmodellen meestal ontworpen met behulp van een CAD-systeem. Deze kunnen zonder veel moeite worden omgezet in het juiste datamodel (inclusief deling, kernprenten en lossingen) voor gebruik bij materiaalaangroeitechnieken.

Voor coquillegieten en spuitgieten worden metalen vormen gebruikt. Het vervaardigen van een metalen vorm of matrijs is veel lastiger dan een vorm van hout of kunststof en brengt veel hogere kosten met zich mee. Bovendien is een coquille- of een spuitgietmachine aanzienlijk duurder dan een eenvoudige zandvormmachine. Dit komt mede door de automatisering.

Het gieten in metalen vormen beperkt zich tot de laagsmeltende metaallegeringen. Hieronder vallen zink-, aluminium- en magnesiumlegeringen (ook wel Zamak genoemd). Coquillegieten van bijvoorbeeld messing is ook nog wel mogelijk, maar voor spuitgieten ligt de grens bij aluminiumlegeringen. Hoogsmeltende materialen als gietstaal, roestvast staal en nikkellegeringen zijn eigenlijk alleen in zand of in keramische vormen te gieten. Gietijzer kan wel in coquilles worden gegoten, maar dit wordt meestal alleen gebruikt bij eenvoudige gietstukken zoals lagerbussen.

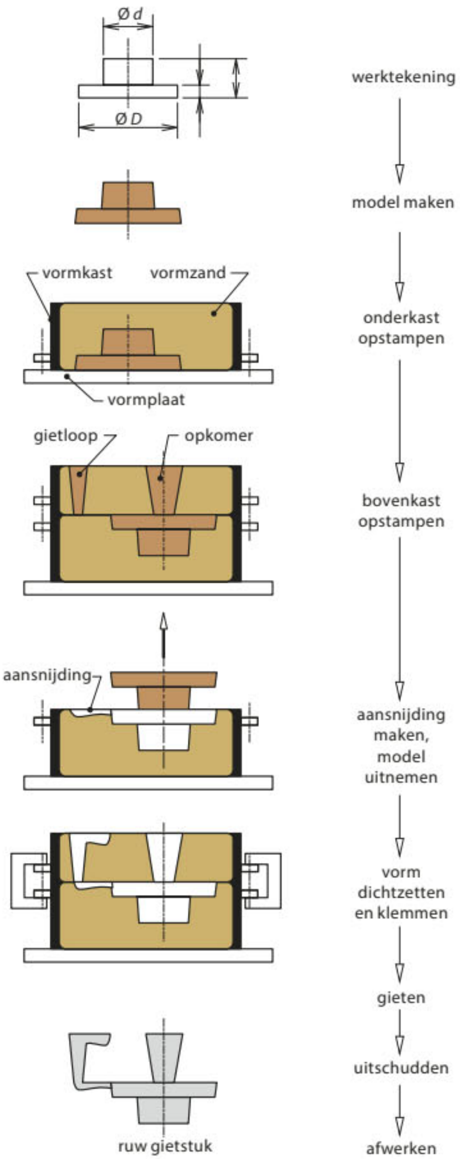
De principes van het vorm- en gietproces zijn het gemakkelijkst uit te leggen voor het **handvormen** in zand voor eenvoudige en kleine gietstukken. Dit proces zullen we dan ook als eerste behandelen. Daarna bespreken we het coquillegieten en het spuitgieten.

3.5 Gieten in zand

3.5.1 Handvormen van een eenvoudig gietstuk

In figuur 3.6 zie je de werkwijze voor het vervaardigen van de vormholte voor een eenvoudig gietstuk. Aan de hand van de werktekening wordt een model gemaakt. De afmetingen van het model wijken daarbij af van de maten in de werktekening, zoals we nog zullen zien. Het proces verloopt als volgt. Het model wordt op een **vormplaat** gelegd. Rondom het model wordt een metalen **vormkast** geplaatst, de **onderkast**. De vormkast wordt daarna gevuld met zand. Dit zand wordt verdicht om de zandvorm de benodigde stevigheid te geven. Dit kan met de hand worden gedaan (met behulp van een stamper), of machinaal (door een combinatie van schokken en persen). Daarna wordt de bovenkant van de vorm gladgestreken. De vormkast met daarin het model wordt omgekeerd.
Op de onderkast wordt nu de **bovenkast** geplaatst. Voordat de bovenkast volgestort kan worden met zand, moeten er voorzieningen getroffen worden om het metaal vanaf de bovenkant in de vormholte te kunnen gieten. Nabij en op het model worden twee langwerpige kegels geplaatst. Deze zijn nodig om de **gietloop** en de **opkomer** te vormen. De opkomer moet poreusheid in het gietstuk voorkomen (zie paragraaf 3.5.2). Na het plaatsen van de kegels kan de bovenkast volgestort worden met

zand en verdicht worden. Voordat de bovenkast van de onderkast wordt afgenomen, worden de kegels voor de gietloop en opkomer verwijderd. Er wordt licht tegenaan getikt met een plastic of houten hamer om te voorkomen dat er zand aan de gietloop en opkomer blijft plakken. Hierdoor ontstaat er enige ruimte tussen de gietloop, de opkomer en de zandvorm. Nu wordt de bovenkast omgekeerd. Vóór het verwijderen van het model moet eerst met een vormspatel de **aansnijding** in de zandvorm van de onderkast worden aangebracht. Deze aansnijding is nodig om het vloeibare metaal uit de gietloop in de vormholte te laten stromen. De gietloop en de aansnijding vormen samen het **gietsysteem**. Om het model uit de vorm te kunnen nemen zonder de zandvorm te beschadigen moet er opnieuw enige ruimte tussen het model en de zandvorm worden gecreëerd. Daarom wordt er weer tegen het model getikt. Nadat het model uit de vorm is genomen, kan de bovenkast weer op de onderkast worden geplaatst. De zandvorm is nu gereed voor het gieten.



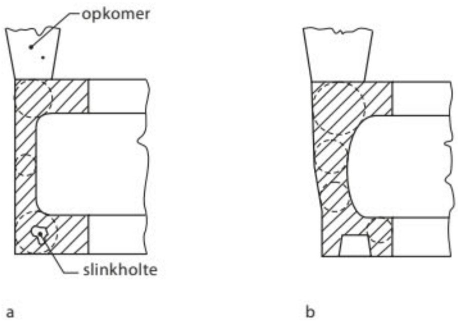
Figuur 3.6 Stadia in de vervaardiging van een gietstuk in zand met behulp van een ongedeeld model

Het gietsysteem, en dan met name de aansnijding, moet zo ontworpen zijn dat de vormholte rustig en geleidelijk kan worden gevuld. De aansnijding wordt altijd in de onderkast op de vormdeling aangebracht. Het moet voorkomen worden dat het vloeibare metaal vanaf 'grote' hoogte in de vorm valt, anders kan er vormzand losspoelen. De plaats van de aansnijding moet daarom met zorg worden gekozen. De doorsnede van het gietsysteem neemt af in de richting van de aansnijding. Op die manier wordt vermeden dat het vloeibare metaal in de vormholte slak, oxiden of lucht meesleept. Opkomers worden zo veel mogelijk op het hoogste punt van het gietstuk geplaatst. De opkomer staat in verbinding met de buitenlucht. Aan de hand van het vollopen van de opkomer kan de gieter het vullen van de vorm volgen.

Als het gietstuk voldoende is afgekoeld, worden de vormkasten leeggeschud. Het zand dat nog aan het gietstuk kleeft wordt verwijderd door stralen. Na het afbreken, afslaan of afzagen van de gietloop en de opkomer is het ruwe gietstuk gereed voor verdere afwerking.
Met het leegschudden van de vormkast wordt de gietvorm vernietigd. Voor elk gietstuk is dus een nieuwe gietvorm nodig.

3.5.2 Slink, krimp en lossing

Bij het stollen van de meeste metaallegeringen treedt slink op (zie paragraaf 2.2.3). Het tekort aan vloeibaar materiaal wordt aangevuld vanuit de opkomer (zie figuur 2.6). Dit voorkomt het optreden van macro- en microporeusheid in het gietstuk. De plaats op het gietstuk en de afmetingen van de opkomer zijn erg belangrijk; daar moet het laatste restje vloeibaar metaal stollen. Door de wanddikte van het gietstuk aan te passen kan worden bewerkstelligd dat de



Figuur 3.7 Risico op slinkholte (a) en gerichte stolling (b)

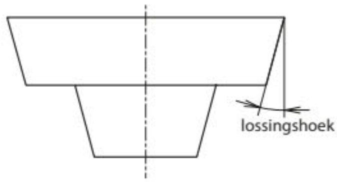
stolling plaatsvindt in de richting van de opkomer. Men spreekt dan van een **gerichte stolling** (zie figuur 3.7). De tijd waarin het materiaal op een gegeven punt stolt, is ongeveer evenredig met het oppervlak van de ingeschreven cirkel in dat punt. De ontwerper voorkomt **slinkholtes** door ervoor te zorgen dat de wanddikten zo verlopen dat de diameters van deze cirkels steeds toenemen in de gewenste richting voor het stollen. Ook worden er vaak opkomers op de hoogst gelegen punten van het gietstuk geplaatst. De lucht die in de gietvorm aanwezig is en de gevormde gassen kunnen daardoor ontsnappen. Zo verkrijgt men een porievrij en gaaf gietstuk.

Bij het vervaardigen van de vorm moet de modelmaker ook rekening houden met de **volumekrimp** van het gietstuk bij afkoelen na het stollen. Daarom voegt hij een **krimptoeslag** toe aan het model. De grootte van deze krimptoeslag wordt bepaald door de afmetingen en de geometrie van het gietstuk en is bovendien afhankelijk van de gietlegering. Gietstaal heeft de grootste krimp (zie figuur 3.8 voor enkele getalwaarden).

Aan oppervlakken die door verspanen worden nabewerkt moet ook nog een **bewerkingstoeslag** worden gegeven (zie hoofdstuk 14). Het uitnemen

Gietlegering	Lineaire krimp
gietijzer	max. 1%
gietstaal	max. 3%
temperijzer, frisijzer	max. 2,5%
brons	max. 1,5%
messing	max. 2%
koper en tin	max. 0,5%
zink	max. 1,5%
lood	max. 1%
aluminium- en magnesiumlegeringen	max. 1,5%

Figuur 3.8 Richtwaarden voor de lineaire krimp



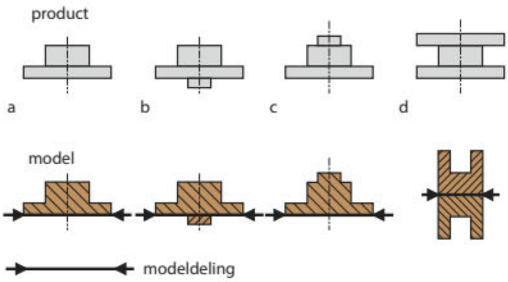
Figuur 3.9 Model van figuur 3.6 met daarin de lossingshoek overdreven aangegeven

van het model gaat gemakkelijker wanneer het model **lossend** wordt gemaakt. Dit doet men door het aanbrengen van een **lossingshoek** (zie figuur 3.9). Deze lossingshoek hangt af van de afmetingen en de geometrie van het gietstuk, maar bedraagt gewoonlijk 1° voor zandgieten en 2° à 3° voor gieten in permanente vormen. De afmetingen van het model zullen dus altijd afwijken van de afmetingen van het eindproduct.

3.5.3 Ondersnijding en deling

Het model van het gietstuk uit figuur 3.6 bestaat slechts uit één deel. Meestal is het echter niet mogelijk om met een ongedeeld model te werken. In figuur 3.10 tonen we een viertal gietstukken. De modellen voor de gietstukken a en c bestaan uit één stuk. De modellen van de gietstukken b en d moeten worden gedeeld om deze uit de zandvorm te kunnen verwijderen. Op de tekeningen van de modellen is het **deelvlak** aangegeven. Bij het vaststellen van de **modeldeling**, en daarmee ook de **vormdeling**, zijn de volgende punten van belang:

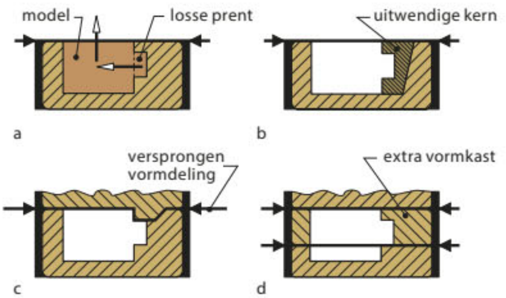
- De modeldeling moet bij voorkeur vlak zijn. Een versprongen modeldeling maakt het vormen moeilijker en daardoor onnodig duur. De vormdeling wordt in het algemeen zo gekozen dat deze het model in twee gelijke delen verdeelt. In de modellen van de gietstukken b en d zijn twee van zulke modeldelingen mogelijk.
- De vormdeling zal altijd op het gietstuk terug te vinden zijn. De boven- en onderkast worden ten opzichte van elkaar gecentreerd door middel van stalen pennen en bussen. De vormkasten kunnen altijd een stukje verschuiven. Dan ontstaat er op het deelvlak van de vorm een oneffenheid op het gietstuk. Ook zal er altijd een kleine hoeveelheid vloeibaar metaal in de vormdeling stromen. De **braam** die daardoor wordt gevormd, moet worden verwijderd, bijvoorbeeld met een slijptol. Een dergelijke bewerking laat altijd sporen op het gietstuk achter, tenzij het betreffende vlak later



Figuur 3.10 Voorbeelden van een ongedeeld model (a) en (c) en van een gedeeld model (b) en (d)

nog verspanend bewerkt wordt. Om esthetische redenen kan voor een vormdeling worden gekozen op een onzichtbare plaats op het product. Bij consumentenproducten wordt aanbevolen het gietstuk zo te ontwerpen dat het geheel in de onderkast gevormd kan worden.

Een model is bij voorkeur lossend, want dat maakt het vormen gemakkelijk. Het is echter ook mogelijk gietstukken te vervaardigen waarvan het model niet lossend is. In figuur 3.11 is het rechterdeel van het gietstuk niet-lossend. Dit wordt **ondersnijding** genoemd. Het model kan alleen uit de vorm worden verwijderd als het voorzien is van een **losse prent** (a). Tijdens het gedeeltelijk vullen van de vorm met zand is de prent met een metalen pen aan het model bevestigd. Het zand rondom de prent wordt verdicht en vervolgens wordt de metalen pen uit de prent getrokken. Dan wordt de rest van de vorm met zand gevuld en wordt het zand verder verdicht. Deze methode verdient niet de voorkeur als een hoge maatnauwkeurigheid belangrijk is, omdat de losse prent tijdens het verdichten van het zand gemak-



Figuur 3.11 Oplossingen voor het vormen van een gietstuk met ondersnijding: model met een losse prent (a), uitwendige kern (b), versprongen modeldeling (c) en extra vormkast (d)

kelijk kan verschuiven ten opzichte van het model. Een tweede oplossing voor deze ondersnijding is het gebruik van een uitwendige kern (b, zie paragraaf 3.5.4). Een derde oplossing is het toepassen van een niet-vlakke vormdeling (c). Het zand boven de prent wordt hierbij met een spatel weggehaald. Een nog duurdere oplossing is het gebruik van een extra vormdeling en vormkast (d).

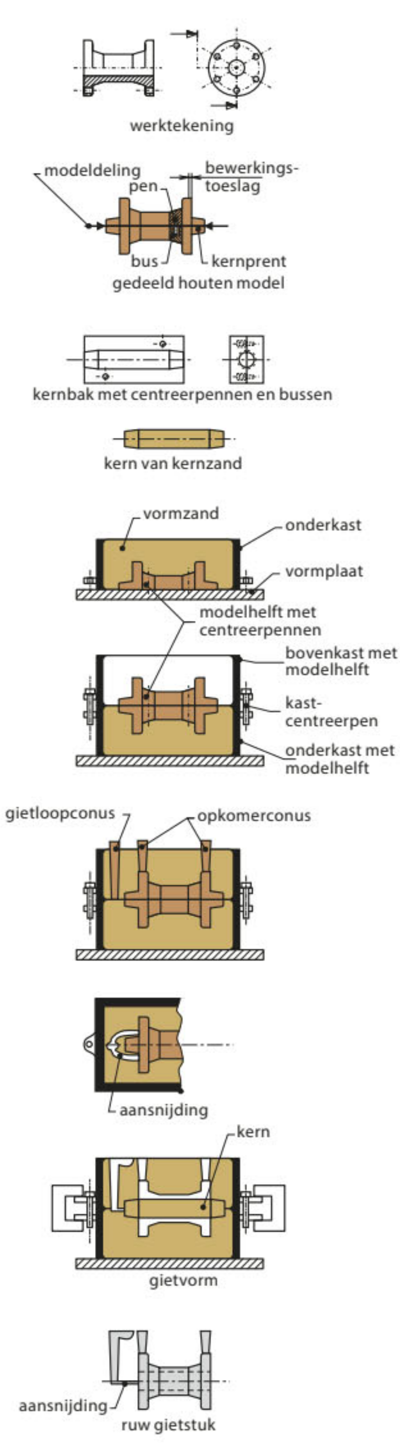
Uiteraard verhoogt een niet-lossend model de kostprijs van een gietstuk. Het is dan ook belangrijk dat de constructeur bij het ontwerpen van het gietstuk al nagaat hoe het gietstuk gemaakt gaat worden en ondersnijdingen vermijdt. Het giettechnisch ontwerpen wordt uitvoeriger behandeld in paragraaf 3.9 en in hoofdstuk 16.

3.5.4 Het toepassen van kernen

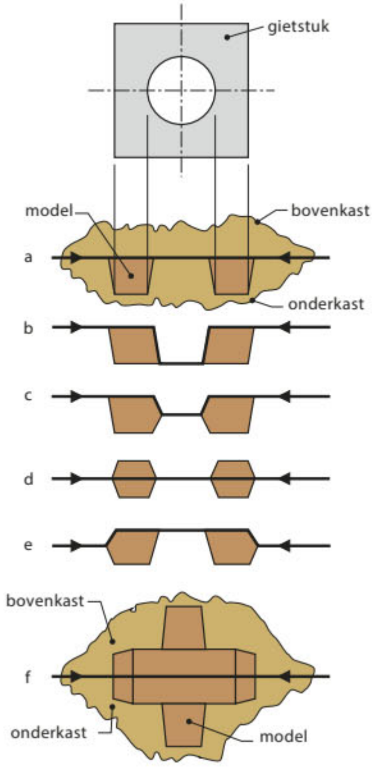
Inwendige kernen

Door gebruik te maken van een **kern** kan een holle ruimte in het gietstuk worden gerealiseerd. Bij het gieten in zand zal altijd van een kern uit zand gebruik worden gemaakt. In figuur 3.12 zie je de toepassing van een kern voor een pijpstuk met twee flenzen. De deling van het model loopt in de lengterichting door het midden van het pijpstuk. Het model is aan beide kanten voorzien van een **kernprent**. Deze zijn nodig om de zandkern te centreren in de gietvorm. Daarnaast voorkomen ze tijdens het gieten het opdrijven van de zandkernen als gevolg van opwaartse krachten. Voor het maken van de kern is een houten of metalen matrijs nodig, die **kernbak** wordt genoemd. De kernbak is in de lengterichting van de kern gedeeld om de kern te kunnen verwijderen.

Om een gat of holte in een gietstuk te realiseren is niet altijd een kern nodig. In figuur 3.13 wordt dit geïllustreerd voor een vlakke plaat met een rond gat. Met de juiste vormdeling kan de kern worden uitgespaard. De afmetingen van de gaten moeten dan niet te klein zijn en de dikte van de plaat niet te groot. Bij dikkere platen en kleinere gaten zal een kern toegepast moeten worden. Anders wordt het opstaande zandgedeelte, dat het gat vormt, mechanisch te zwak. Het kan dan afbreken bij het vormen of tijdens het instromen van het vloeibare metaal. Bij een verticale plaatsing van de plaat is altijd een kern nodig (f).



Figuur 3.12 Het vormen van een pijpstuk met kern

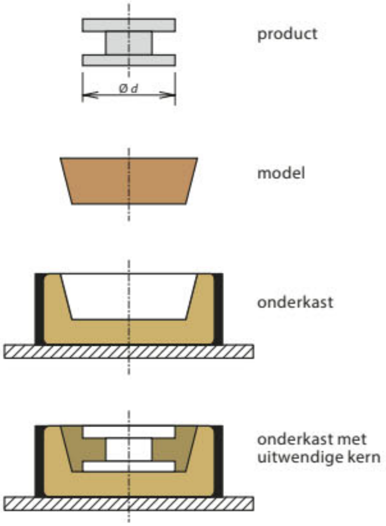


Figuur 3.13 Het vormen van een plaat met een gat op verschillende manieren

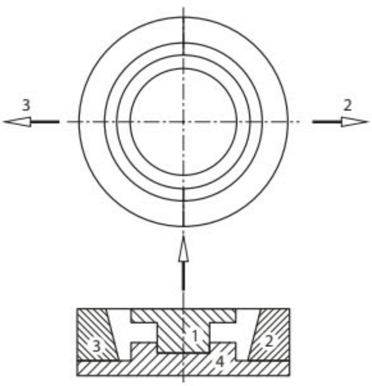
Uitwendige kernen

Grote en zeer complexe kleine gietstukken kunnen nog op een geheel andere manier worden vervaardigd. In plaats van uit te gaan van een groot en/of complex, en daardoor kostbaar, model wordt dan uitgegaan van een eenvoudig model en een aantal **uitwendige kernen**. Deze kernen zijn vervaardigd uit speciaal kernzand, en niet uit normaal vormzand. Figuur 3.14 toont deze werkwijze voor gietstuk d uit figuur 3.10. De vormholte wordt geheel in de onderkast gemaakt. De uiteindelijke gietvorm ontstaat door het plaatsen van de kern(en). Deze werkwijze heeft een aantal voordelen:

- Het is gemakkelijker lossende kerndelen te maken dan om het gehele model lossend te maken. De kernbak voor dit gietstuk is opgebouwd uit vier delen die gemakkelijk uit elkaar zijn te nemen (zie figuur 3.15).
- Het gietstuk is in één gietkast ondergebracht. Als de onder- en bovenkast ten opzichte van elkaar verschuiven, zal dat niet tot maatafwijkingen in het gietstuk leiden.



Figuur 3.14 Toepassingsvoorbeeld van een uitwendige kern



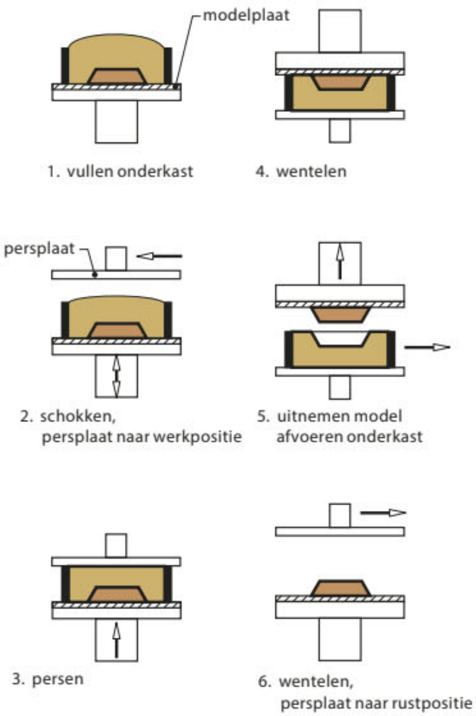
Figuur 3.15 Kernbak voor het vervaardigen van de uitwendige kern uit figuur 3.14

Voorbeelden van gietstukken die vervaardigd worden door gebruik van uitwendige kernen, zijn frames van grote bewerkingsmachines, cilinders van grote scheepsmotoren, pomphuizen van grote centrifugaalpompen en turbinehuizen. Men spaart bij dergelijke gietstukken een vormholte (vormput) uit in de grond om de gietvorm te realiseren. De kernen passen als puzzelstukken in elkaar. Voor dit grote gietwerk wordt gebruikgemaakt van vormzand dat door een chemische reactie hard wordt (zie paragraaf 3.5.6). Verdichten van het zand is dan niet meer nodig.

3.5.5 Mechanisatie van het zandgieten

Het maken van vormen met een vormmachine

De eerste toegepaste mechanisatie bij het gieten was het gebruik van de **schok-pers-wentelvormmachine**. De **modelplaat** is bij een dergelijke machine bevestigd op een tafel (zie figuur 3.16). Boven de tafel is een vultrechter geplaatst. Via deze vultrechter wordt de vormkast volgestort met zand. Verdichting van het zand wordt bereikt door een schokbeweging van de tafel, gevolgd door het persen met een stempel aan de bovenkant van de vormkast. Bij het schokken van de tafel zal voornamelijk het zand om het model worden verdicht. Bij het persen zal hoofdzakelijk de bovenkant van het zand in de vormkast een grotere dichtheid verkrijgen. De tafel wordt 180° gedraaid, daarna kan het model worden uitgenomen. De onderste helft van de gietvorm is dan gereed. Op dezelfde manier kan de bovenste helft worden vervaardigd. Bij sommige typen vormmachines zijn alle handelingen volledig gemechaniseerd. Bij andere vinden ze nog gedeeltelijk met de hand plaats.



Figuur 3.16 Principe van de schok-pers-wentelvormmachine

Vorm- en gietautomaten

De volgende stap in de mechanisering van het zandgieten was de ontwikkeling van **vorm- en gietautomaten**. Met dergelijke machines vindt het vormen en het gieten volledig automatisch plaats. De vormer en gieter zijn vervangen door een operator. Er zijn twee soorten vormautomaten: vormautomaten waarbij gebruikgemaakt wordt van vormkasten en vormautomaten waarmee kastloos wordt gevormd. Kastloos vormen kan plaatsvinden met een horizontale vormdeling, maar ook met een verticale vormdeling. Een bekend kastloos systeem met een verticale vormdeling is **Disamatic** (merknaam). De werking van dit systeem is weergegeven in figuur 3.17.

De kamer waarin wordt gevormd maakt deel uit van de vormmachine. De modelplaten sluiten de zijkanten van de vormruimte af. De modelhelften bevatten elk de helft van het gietsysteem en de opkomers. Na het vullen van de kamer met zand (a) en het samenpersen van het zand (b) wordt de rechter modelplaat teruggetrokken en weggeklapt (c). Met de linker modelplaat wordt de vorm daarna naar rechts uit de kamer gedrukt en tegen de voorlaatste vorm aangeschoven. Hierdoor schuift de gehele rij vormen één vormdikte op. Vervolgens kunnen kernen worden geplaatst. Dit kan zowel met de hand als geautomatiseerd gebeuren. Het gehele proces herhaalt zich, waarbij steeds de volgende vorm op de vorige vorm aansluit. Op deze wijze ontstaat een aaneengesloten rij van zandblokken met telkens op het scheidingsvlak het gietsysteem. Het gieten vindt vrijwel direct na het vormen plaats en kan met de hand gebeuren of volledig automatisch. Met een dergelijke vormautomaat is het mogelijk meer dan 300 vormen per uur te vervaardigen. In één vorm kunnen diverse gietstukken worden ondergebracht, zodat in korte tijd een groot aantal gietstukken kan worden vervaardigd. Hoeveel precies is uiteraard afhankelijk van de afmetingen. De afmetingen van de gietstukken zijn bij het Disamatic-systeem begrensd. De kernen zijn bij dit systeem met een verticale vormdeling moeilijker in de vorm te leggen dan bij een horizontale vormdeling. Figuur 3.18 toont een complete gietstraat (vormen, gieten, stollen, afkoelen, uitbreken van de gietvorm en reinigen door stralen).



Figuur 3.17 Principe van de Disamatic-vormmethode

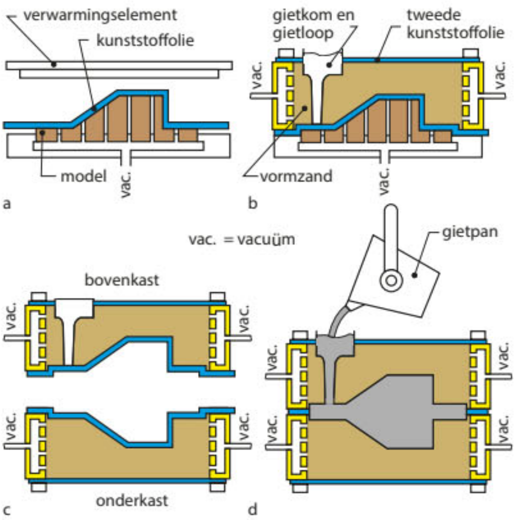
Bij vormautomaten met een horizontale modeldeling kan zowel met als zonder vormkasten worden gewerkt. Vormkasten genieten echter de voorkeur, vooral bij grotere gietstukken. Een systeem waarbij vormkasten worden gebruikt is gecompliceerder dan een systeem zonder vormkasten, omdat er naast de zandtoevoer ook een toevoer van vormkasten is. De productiesnelheid bij vormautomaten met vormkasten ligt daarom lager dan bij vormautomaten zonder vormkasten, zoals het Disamatic-systeem.

Verbeteringen op het gebied van het mechaniseren van het vormen in zand concentreren zich op het verdichten van het zand. In het **Seiatsu-proces** gebeurt dit door perslucht door het zand te blazen. Via fijne roostertjes in de vormplaat wordt deze perslucht afgevoerd. Rondom het model wordt zo een zeer gelijkmatige verdichting van het zand verkregen. Er kunnen met deze methode hogere gietstukken gemaakt worden dan bij het traditionele schokken en persen.

In het geval van **vacuümvormen** (bij zandgieten) wordt een kunststoffolie licht verwarmd en vervolgens onder invloed van vacuüm over de modelhelft getrokken (zie figuur 3.19). Hierover wordt een vormkast geplaatst en deze wordt gevuld met droog, niet-gebonden vormzand. Een tweede kunststoffolie wordt boven op het zand gelegd en door vacuümtrekken wordt het een compact geheel. De modelhelft kan nu worden verwijderd. De beide helften van de gietvorm worden samengevoegd en blijven onder vacuüm, waarna de vormholte, die niet op het vacuümsysteem is aangesloten, wordt gevuld met vloeibaar metaal.



Figuur 3.18 Schema van een complete gietstraat met een vormautomaat



Figuur 3.19 Vacuümvormen (bij zandgieten)

Met vacuümvormen kunnen nauwkeurige gietstukken met een hoge oppervlaktekwaliteit vervaardigd worden. Deze hoeven niet lossend te zijn. Het proces kenmerkt zich door geringe modelkosten en geringe kosten voor het gebruik en hergebruik van niet-gebonden vormzand, maar ook door een langere cyclustijd.

De laatste ontwikkeling op het gebied van het maken van gietvormen en kernen zonder een houten model, is de toepassing van een 3D-zandprinter. De technologie van het 3D-printen wordt in hoofdstuk 8 toegelicht.

3.5.6 Vormmaterialen

In deze paragraaf bespreken we achtereenvolgens kleigebonden vormzand, chemisch gebonden vormzand, kernzand en schaalvormen.

Kleigebonden vormzand

Bij handmatig vormen wordt in het algemeen gebruikgemaakt van **kleigebonden vormzand**. Dit is kwartszand waaraan 5-7% klei en 2-3% water is toegevoegd. De sterkte van de zandvorm neemt toe naarmate het kleigehalte en de verdichting toenemen. Als de verdichting toeneemt, neemt echter de gasdoorlaatbaarheid af. Hierdoor kunnen tijdens het gieten de in de vormholte aanwezige gassen niet snel genoeg ontsnappen. Daardoor kan er poreusheid in het gietstuk ontstaan. Om die reden zijn het kleigehalte en de mate van verdichting (en daarmee de sterkte van het kleigebonden vormzand) aan een maximum gebonden.

De oppervlaktekwaliteit van zandgietwerk kan voor gietijzer en gietstaal verbeterd worden door aan het vormzand een geringe hoeveelheid grafietpoeder (0,5%) toe te voegen. Als het grafietpoeder in aanraking komt met het vloeibare metaal, verbrandt het. Door gasafscherming voorkomt het een eventuele chemische reactie tussen het vloeibare metaal en het vormmateriaal. Kleigebonden vormzand waaraan grafietpoeder is toegevoegd, is te herkennen aan de zwarte kleur.

Een belangrijk voordeel van kleigebonden vormzand is de mogelijkheid om het zand opnieuw te gebruiken nadat het is gereinigd. De installatie die nodig is om kleigebonden vormzand te regenereren neemt een aanzienlijk deel van de ruimte in de gieterij in beslag.

Chemisch gebonden vormzand

Chemisch gebonden vormzand verkrijgt zijn sterkte door een reactie van aan het vormzand toegevoegde bestanddelen. Verdichten van dit zand is nauwelijks nodig. Voorbeelden hiervan zijn **CO_2-zand** of **waterglaszand**, **furaanzand** en **cementzand**. Bij deze zandsoorten vindt de chemische reactie (het uitharden) bij kamertemperatuur plaats. Bij zandsoorten waaraan kunstharsen zijn toegevoegd, gebeurt het uitharden bij verhoogde temperatuur. Dit is onder meer bij schaalvormen het geval.

Bij CO_2-zand wordt een geringe hoeveelheid waterglas (natriumsilicaat) aan het vormzand toegevoegd. Uitharding van dit zand vindt plaats door reactie met in de lucht aanwezige CO_2 en duurt enige uren tot dagen, afhankelijk van de afmetingen van de vorm. Als CO_2 door de zandvorm wordt geleid, is de uithardingstijd slechts enkele minuten. Deze methode wordt zowel voor vormen als voor kernen toegepast.

Furaanzand hardt bij kamertemperatuur uit door polymerisatie van het furaanhars onder invloed van fosforzuur of van organische zuren. Door de hoeveelheid fosforzuur is de opstijftijd te regelen; deze kan variëren van circa 10 minuten tot enige uren. De sterkte van dit vormzand is hoog; dit resulteert in een betere maatnauwkeurigheid dan bij kleige-

bonden vormzand. Dit type zand wordt veelvuldig toegepast bij kleine series voor middelgrote en grote delen. Furaanzand wordt ook veel gebruikt voor grote uitwendige kernen.

Een nog hogere sterkte kan bereikt worden met cementzand. Aan dit zand wordt circa 10% cement en wat water toegevoegd. De vormmassa verhardt aan de lucht in enige tientallen uren. Dit zand is daardoor niet geschikt voor seriewerk van kleine gietstukken en wordt voornamelijk toegepast bij het maken van grote gietstukken waarbij de vorm is opgebouwd uit kernen.

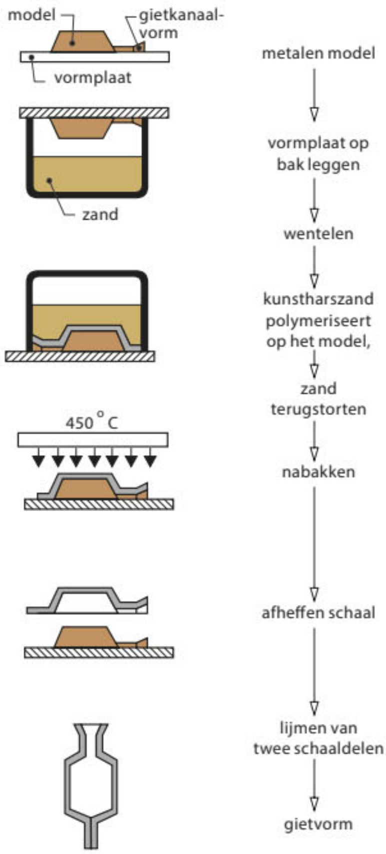
Kernzand

Aan **kernzand** worden in het algemeen hogere eisen voor sterkte, vuurvastheid en gasdoorlaatbaarheid gesteld dan aan vormzand. De kern wordt immers volledig door vloeibaar metaal omgeven en zal ook vaak op buiging worden belast als gevolg van de opwaartse druk door het vloeibare metaal. Het is ook belangrijk dat de kern na het stollen van het gietstuk zijn sterkte grotendeels verliest, zodat het uitbreken ervan gemakkelijk verloopt.

Voor het maken van kernen wordt gebruikgemaakt van zand. De reactie van de aan het zand toegevoegde bestanddelen vinden zowel bij kamertemperatuur als bij verhoogde temperatuur plaats. Bij de **cold-box-methode** komt de chemische reactie op kamertemperatuur tot stand, door het doorleiden van een gas. Bij de **hot-box-methode** betreft het een chemische reactie van een thermoharder met een katalysator bij een hogere temperatuur. De cold-box-methode is voor de meeste toepassingen geschikt. Voor dunwandige kernen wordt echter de hot-box-methode toegepast vanwege de grotere sterkte.

Schaalvormen

Bij **schaalvormen** wordt gebruikgemaakt van een zandsoort waarvan de korrels omgeven zijn door een thermohardende kunststof. Dit zand wordt op een (elektrisch) verwarmde (300 °C) metalen vormplaat, met model en gietsysteem, gestort. Door polymerisatie van de kunststof vormt zich een harde laag, de schaal, rondom het model. Na enige tijd is deze schaal dik genoeg. De modelplaat wordt dan gekeerd, zodat het niet-gepolymeriseerde zand naar beneden kan vallen en voor de volgende schaalvorm gebruikt kan worden. Voordat de schaal van het



Figuur 3.20 Principe van de schaalvormmethode

model wordt gelicht, wordt deze nagebakken bij een temperatuur van circa 450 °C. Door twee van deze schalen aan elkaar te lijmen ontstaat een complete gietvorm (zie figuur 3.20).

Bij schaalvormen wordt gebruikgemaakt van relatief fijn zand. De hoge warmsterkte van dit vormzand voorkomt het uitbreken van zandkorrels tijdens het gieten. Dit levert een scherp afgetekend en nauwkeurig gietstuk op met een hoge oppervlaktekwaliteit.

Schaalvormen is uitermate geschikt voor vlakke en dunwandige gietstukken met niet al te grote afmetingen. Bij grote en hoge gietstukken zullen de beide schaalhelften gaan doorbuigen als gevolg van de hydrostatische druk van het vloeibare metaal. Om doorbuiging te voorkomen worden verscheidene gietvormen in een bak met staalgrit geplaatst. Dit zorgt voor een goede ondersteuning. Daarnaast is

de warmteafvoer beter en stolt het materiaal sneller, wat gunstig is voor de mechanische eigenschappen van het gietstuk.

Met het schaalvormproces kunnen niet alleen gietvormen worden gemaakt, maar ook kernen. Door een aantal schaalkernen en schaalvormen als puzzelstukken in elkaar te passen kunnen gecompliceerde gietstukken worden vervaardigd.

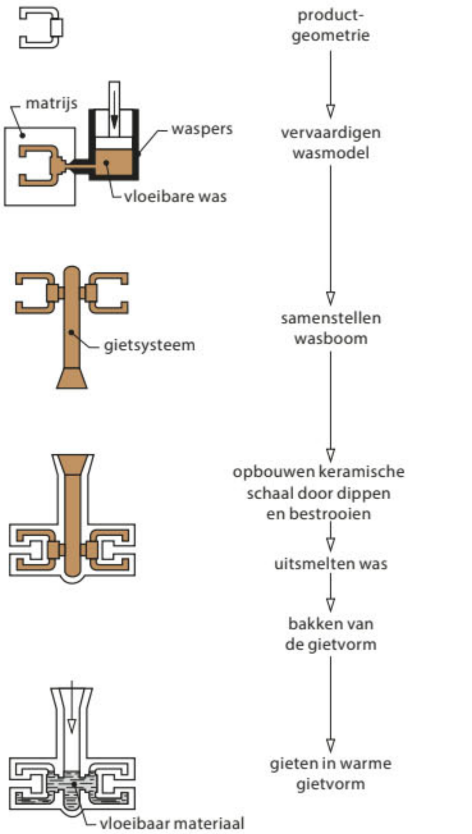
Schaalvormen is geschikt voor hoogsmeltende en laagsmeltende legeringen. De metalen modellen zijn echter kostbaar. Het proces leent zich dus alleen voor grote productaantallen. Schaalvormen heeft terrein verloren door de ontwikkeling van de vormautomaten. Hiermee kunnen vergelijkbare nauwkeurigheden en oppervlaktekwaliteiten behaald worden.

3.6 Verloren-modelmethoden

De meest toegepaste en bekendste variant van het **verloren-modelproces** is het **verloren-wasmodelproces**, de vormtechniek waarbij een model uit was wordt gebruikt. Daarnaast bespreken we in deze paragraaf ook een variant op dit proces, het verloren-schuimmodelproces.

Het verloren-wasmodelproces is al circa 3500 jaar oud en werd oorspronkelijk gebruikt voor het vervaardigen van sieraden en kunstvoorwerpen. De gietstukken kenmerken zich door een uitstekende oppervlaktegesteldheid en een hoge maatnauwkeurigheid. Daarom is er meestal geen of slechts weinig nabewerking nodig. Moeilijk te verspanen hoog smeltende materialen worden vaak op deze manier gegoten. Onder andere onderdelen voor straalmotoren en gasturbines, en gecompliceerde fijnmechanische onderdelen worden met dit proces vervaardigd.

Het proces verloopt in een aantal stappen (zie figuur 3.21). Eerst wordt er een matrijs vervaardigd, het negatief van het model. Vervolgens wordt deze matrijs gevuld met vloeibare was. Meestal gebeurt dat onder enige druk in een **waspers**. Om kosten te besparen kan men een aantal kleine wasmodellen samenvoegen met een gietsysteem tot een **wasboom**. Grotere modellen zijn uiteraard zelf voorzien van een gietsysteem. Na het maken van het wasmodel of het samenstellen van de wasboom wordt deze ondergedompeld in een zelfopstijvende keramische



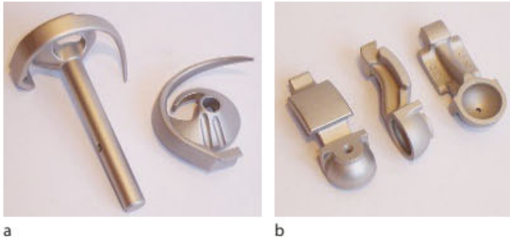
Figuur 3.21 Principe van de verloren-wasmodelmethode

'*slurry*', bestaande uit fijnkorrelig zirkoonoxide, ethylsilicaat, water en alcohol. Op het model vormt zich een dunne keramische laag (zie figuur 3.22). Door het model herhaaldelijk onder te dompelen in de keramische 'slurry' neemt de laagdikte van de keramische schil toe. Het model wordt verwijderd door de was uit te smelten bij een temperatuur van circa 120 °C. Na het uitsmelten van de was en het bakken van de keramische vorm op circa 1000 °C is de vorm gereed voor het gieten.

Omdat het model wordt uitgesmolten, hoeft dit niet lossend te zijn. Voor het maken van een gering aantal modellen uit was worden rubberen matrijzen gebruikt. Voor grootserie- en massafabricage worden altijd metalen matrijzen toegepast. Bij een complex model kan gewerkt worden met een metalen matrijs met verschillende matrijsdelingen om het niet-lossende model uit de matrijs te kunnen halen. Ook kan het wasmodel uit afzonderlijke lossende



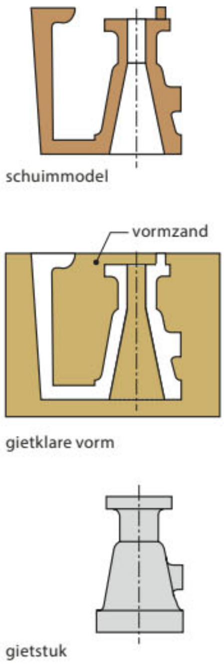
Figuur 3.22 Dompelen van een 'wasboom' met 12 werkstukken (Cirex)



Figuur 3.23 Producten vervaardigd met het verloren-wasmodelproces: delen van een knoopunit voor balenpersen (a) en tuimelaars voor brandstofmotoren (b) (Cirex)



Figuur 3.24 Ventilatorhuis (titaanlegering, Ø 1000 x 500 mm)



Figuur 3.25 Schematische voorstelling van het verloren-schuimmodelproces

delen opgebouwd worden. In dat geval kunnen de matrijzen eenvoudiger zijn.

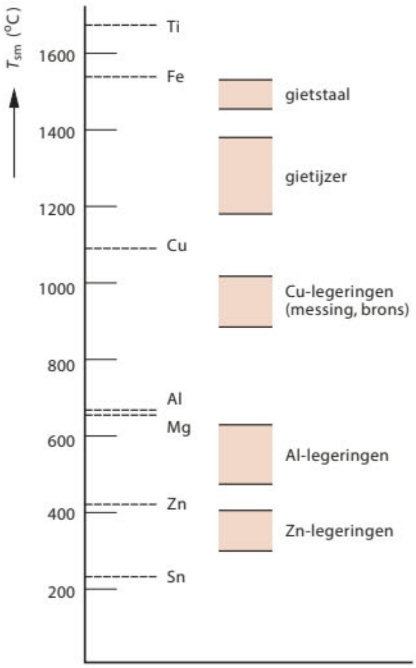
Het verloren-wasmodelprocedé is een duur proces, omdat zowel het model als de vorm slechts eenmaal gebruikt kan worden. De methode wordt dan ook voornamelijk toegepast voor kleine, ingewikkelde gietstukken uit materialen die moeilijk verspanend te bewerken zijn. De grote maatnauwkeurigheid van het gietproces maakt nabewerken vaak overbodig (zie figuur 3.23). Uit figuur 3.24 blijkt dat de methode zich niet alleen beperkt tot kleine onderdelen; je ziet hier een uit titaan gegoten deel van een straalmotor. Dit ene gietstuk vervangt een constructie die bestond uit 12 giet- en smeedstukken. Het toepassen van het verloren-wasmodelproces levert in dit geval een aanzienlijke kostenbesparing op.

Een variant op het wasmodel is een model uit polystyreenschuim. Deze kunststof modellen zijn groter dan de modellen uit was. Dit vorm- en gietproces is geschikt voor middelgrote en grote gietstukken, met afmetingen tot meerdere meters. Er worden bijvoorbeeld motorblokken en cilinderkoppen mee gemaakt. De schuimmodellen worden bij kleinere series opgebouwd door het aan elkaar lijmen van blokken en platen. Bij grotere series worden ze vervaardigd door kunststofkorrels in een matrijs op te schuimen. In figuur 3.25 is het **verloren-schuimmodelproces** schematisch weergegeven. Om beschadiging van het model tijdens het vormen in zand te voorkomen, is het model voorzien van een 0,1

mm dikke keramische coating. Tijdens het gieten zal het polystyreenschuim ontleden en de ontstane gassen zullen door het omringende zand worden opgenomen. De kwaliteit van het oppervlak van het gietstuk wordt bepaald door de korrelgrootte van het model uit polystyreenschuim. Gietstukken gemaakt met de verloren-schuimmodelmethode hebben geen braam. Bovendien is er sprake van een grotere vormvrijheid dan bij het gieten in kleigebonden vormzand, omdat het model niet lossend hoeft te zijn.

3.7 Gieten in permanente vormen

Bij alle vorm- en gietmethoden die we tot nu toe hebben behandeld, moet de gietvorm worden vernietigd om het gietstuk uit de vorm te kunnen halen. De gietvorm kan dus slechts eenmaal gebruikt worden. Het vormproces keert steeds terug en is vaak arbeidsintensief. Bij grote productaantallen is het daarom vaak gunstiger om eenmalig een metalen gietvorm te fabriceren. Deze permanente vorm of matrijs is voor het gieten van metaallegeringen vervaardigd uit gereedschapsstaal. Een absolute voorwaarde is dat het gietstuk, inclusief het gietsysteem, lossend is. De matrijs heeft in het algemeen een vlakke deling.



Figuur 3.26 Smelttemperatuur van een aantal zuivere metalen en gietlegeringen

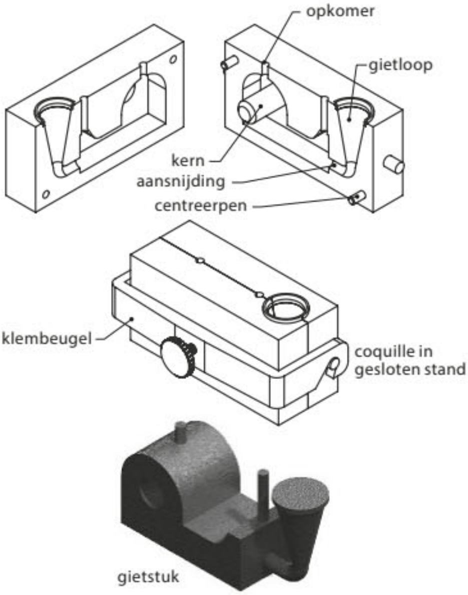
De eenmalige kosten van de matrijs worden voor een groot deel bepaald door de vorm en afmetingen van het gietstuk en de eigenschappen van het gereedschapsstaal. De levensduur van de matrijs wordt bepaald door de **giettemperatuur**, die in het algemeen circa 100 °C hoger ligt dan de smelttemperatuur van de betreffende legering, en door de vorm en afmetingen van het gietstuk. Figuur 3.26 geeft een indicatie van de smelttemperatuur van de meest gebruikte gietlegeringen.

In de volgende paragrafen zullen we verschillende manieren van gieten in permanente vormen bespreken. We onderscheiden ze van elkaar door te kijken naar hoe de metalen gietvorm wordt gevuld. De processen die we bespreken zijn:
- **coquillegieten**, waarbij gebruikgemaakt wordt van de zwaartekracht om de vorm te vullen;
- **lage-drukgieten**, waarbij de vorm gevuld wordt onder een geringe overdruk en tegen de zwaartekracht in;
- **spuitgieten**, waarbij de vorm onder hoge druk wordt gevuld.

3.7.1 Coquillegieten

Een **coquille** bestaat uit twee of meer metalen matrijsdelen die goed op elkaar aansluiten en in gesloten toestand door middel van pennen ten opzichte van elkaar gefixeerd zijn (zie figuur 3.27). Een beugel zorgt ervoor dat de beide coquillehelften tijdens het gieten op elkaar geklemd blijven. Coquillegieten wordt vaak nog met de hand uitgevoerd, maar kan ook geheel of gedeeltelijk worden gemechaniseerd. Met een gietlepel wordt de coquille gevuld en onder invloed van de zwaartekracht stroomt het vloeibare metaal in de vormholte, net als bij zandgieten. Bij coquillegieten kan gebruikgemaakt worden van zandkernen en metalen kernen. Het maken van inwendige holten vormt dus geen probleem. Metalen kernen moeten wel lossend zijn. Met dit proces kunnen betrekkelijk complexe gietstukken worden gemaakt.

Coquillegieten wordt voornamelijk toegepast voor het maken van gietstukken uit niet-ijzerlegeringen. Het gieten van gietijzer is mogelijk wanneer de vorm van de producten betrekkelijk eenvoudig is. De levensduur van de coquille neemt af naarmate



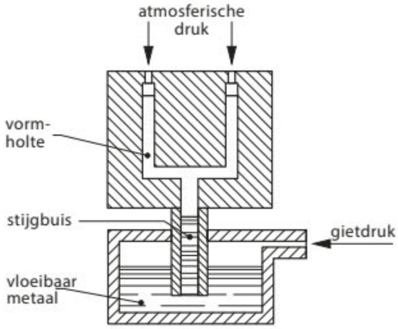
Figuur 3.27 Coquille voor handmatig gieten

de giettemperatuur van de gietlegeringen toeneemt. Dit betekent concreet dat bij aluminiumlegeringen met een coquille 20.000 tot 30.000 gietstukken kunnen worden gemaakt. Bij messing zijn er dat 10.000 tot 20.000 en bij gietijzer slechts 2.000 tot 3.000. Bij gietijzer mag de afkoeling na het gieten niet te snel verlopen, omdat anders na het stollen een zeer bros materiaal ontstaat, dat niet verspanend te bewerken is.

Coquillegieten wordt in het algemeen toegepast voor kleine en relatief eenvoudige gietstukken waarvan een groot aantal moet worden gemaakt. Coquillegieten is minder nauwkeurig dan de verloren-wasmodelmethode. Wanneer de coquillehelften in goede conditie worden gehouden, levert dit gietproces echter een goede maatnauwkeurigheid en een glad oppervlak op. Er is dan weinig nabewerking van het gietstuk nodig.

3.7.2 Lage-drukgieten

Lage-drukgieten kan zowel bij een metalen vorm als bij een zandvorm worden toegepast. De vorm wordt boven op de smeltoven geplaatst (zie figuur 3.28). Door de oven onder een geringe overdruk (30-100 kPa) te brengen stroomt het vloeibare metaal door een stijgbuis in de vormholte. Door de vorm geleidelijk en rustig te vullen vanaf de onderzijde kunnen



Figuur 3.28 Principe van het lage-drukgieten

lucht en gassen goed ontsnappen. Het koudste metaal bevindt zich aan de bovenzijde van de vorm en de stolling zal daar beginnen. Daarna verplaatst de stolling zich in de richting van de toevoer van het vloeibare metaal. De stijgbuis werkt daardoor als opkomer. Deze methode levert porievrije gietstukken op met een goede oppervlaktekwaliteit. Er kunnen metalen kernen en zandkernen worden gebruikt.

Metalen vormen die bij lage-drukgieten worden gebruikt, bestaan net als bij coquillegieten uit twee helften. Het openen en sluiten van de matrijsdelen en het uitwerpen van het gietstuk gebeurt automatisch. Een cyclus duurt 2 tot 6 minuten. Lage-drukgieten wordt hoofdzakelijk gebruikt voor de vormgeving van aluminium- en magnesiumlegeringen. Typische voorbeelden van producten die op deze manier worden vervaardigd, zijn motorblokken, cilinderkoppen, inlaatspruitstukken en autovelgen.

Een variant op het lage-drukgietproces is **vacuümgieten**, waarbij vacuüm gebruikt wordt om het vloeibare metaal door de stijgbuis in de vormholte te laten stromen. In vergelijking met lage-drukgieten zijn bij vacuümgieten de gietstukken veel minder poreus. Bovendien kunnen met vacuümgieten geringere wanddiktes worden verkregen.

3.7.3 Spuitgieten

Bij spuitgieten wordt het vloeibare metaal onder hoge druk in de metalen vorm of matrijs gespoten. Het is een volledig gemechaniseerd proces. De spuitgietmachine (zie figuur 3.29) bestaat uit een pompgedeelte dat het vloeibare metaal in de vorm perst en een mechanisme dat de metalen vorm sluit,



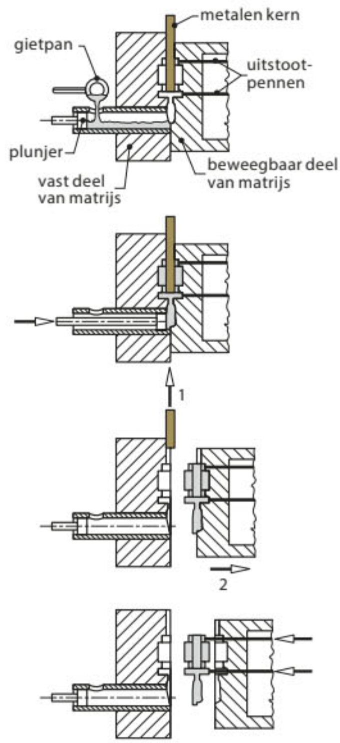
Figuur 3.29 Spuitgietmachine voor het spuitgieten van metalen (Bühler)

de druk tijdens het gieten opvangt en aan het einde van de gietcyclus de matrijs opent en het gietstuk uitstoot.

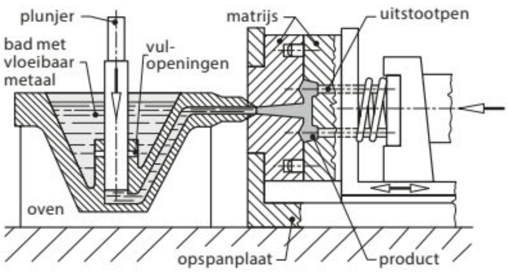
We onderscheiden twee verschillende spuitgietmethoden, op basis van de wijze waarop het vloeibare metaal uit de oven in de matrijs wordt gebracht:

- De **koudportaalmethode**, waarbij het injectiekanaal voor elk 'shot' van de benodigde hoeveelheid vloeibaar metaal wordt voorzien (zie figuur 3.30). Deze methode leent zich goed voor aluminium- en magnesiumlegeringen. Ook messing kan nog net worden verspoten, maar het spuitgieten van dit materiaal komt nauwelijks voor. De gebruikelijke drukken liggen tussen 15-70 MPa, in uitzonderingsgevallen oplopend tot 150 MPa. De levensduur van de matrijs ligt tussen 50.000 en 250.000 stuks, afhankelijk van de gewenste oppervlaktekwaliteit.
- De **warmportaalmethode**, waarbij het injectieportaal permanent is ondergedompeld in het gesmolten metaal (zie figuur 3.31). Deze methode werkt sneller dan de koudportaalmethode en is gemakkelijker te automatiseren. Deze werkwijze is alleen geschikt voor laagsmeltende legeringen, zoals lood- en zinklegeringen. Legeringen met een hoger smeltpunt, zoals aluminiumlegeringen, zouden het injectiesysteem te veel aantasten. De toegepaste drukken bij deze methode zijn betrekkelijk laag en variëren van 3 tot 30 MPa. De metalen vorm kan bij zinklegeringen voor ongeveer 250.000 gietstukken worden gebruikt.

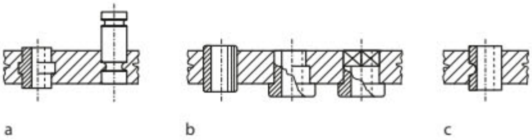
Met het spuitgietproces kunnen complexe en dunwandige (≥ 0,5 mm) gietstukken worden vervaardigd, mits ze lossend zijn en door **uitstootpennen** gemakkelijk uit de matrijs zijn te verwijderen. Er kunnen alleen lossende metalen kernen worden gebruikt. Zandkernen zouden door de hoge spuitdruk verpulveren. Wanddikten boven 6-8 mm moeten bij dit proces vermeden worden, omdat navulling van het gietstuk om de slink op te heffen onmogelijk is. Daarnaast duurt bij dergelijke wanddikten de stolling van het gietstuk te lang en wordt de matrijs thermisch te zwaar belast. Door de hoge druk kan men een uitstekende vormvulling en



Figuur 3.30 Principe van het spuitgieten volgens de koudportaalmethode



Figuur 3.31 Principe van het spuitgieten volgens de warmportaalmethode



Figuur 3.32 Voorbeelden van verankering van ingegoten onderdelen tegen uittrekken (a), verdraaien (b) en uittrekken en verdraaien (c)

een scherpe aftekening van de matrijs verkrijgen. De maatnauwkeurigheid en de oppervlaktegesteldheid zijn daardoor zeer goed. Nabewerking van de gietstukken beperkt zich in het algemeen dan ook tot het verwijderen van het gietsysteem. De vervaardiging van de matrijs is een kostbare zaak en de investeringskosten voor de spuitgietmachine zijn hoog. Daarom is deze methode alleen geschikt voor het vervaardigen in grootserie- en massafabricage.

Voorbeelden van spuitgietproducten zijn carters, cilinderkoppen en versnellingsbakken. De afmetingen van de gietstukken zijn beperkt in verband met de hoge spuitdrukken en de daarmee samenhangende hoge sluitkrachten. De grens ligt bij een op het deelvlak geprojecteerd productoppervlak van ca. 0,5 m^2.

Bij coquillegieten en spuitgieten van aluminium-, magnesium- en zinklegeringen worden vaak stalen onderdelen meegegoten (voor een betere slijtvastheid). Die onderdelen (**inserts**) worden dan van tevoren in de matrijs aangebracht. Bij metalen inserts mag de wanddikte om de insert niet te klein worden in verband met de kans op koudloop (voortijdige stolling). De insert wordt dan niet volledig met vloeibaar metaal omringd. Bovendien is er een goede verankering nodig, om te voorkomen dat de inserts bij belasting uit het materiaal worden getrokken (zie figuur 3.32).

3.7.4 Gieten met rotatiebeweging

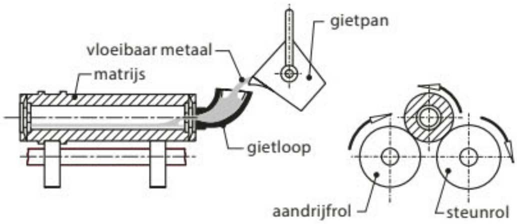
Bij giettechnieken met rotatiebeweging wordt de permanente gietvorm tijdens het gieten geroteerd. In deze paragraaf bespreken we wentelgieten, centrifugaal- en rotatiegieten. Dit zijn gietprocessen die geschikt zijn voor het maken van producten met een op deze processen afgestemde vormgeving. Het voordeel van de rotatiebeweging is dat de gietvorm goed kan worden gevuld.

Wentelgieten

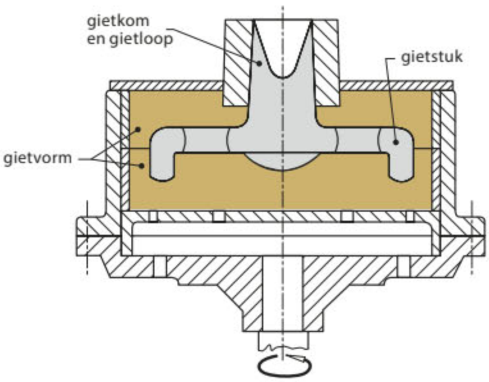
Bij het gieten in een metalen matrijs begint de stolling van het materiaal aan het binnenoppervlak van de koude matrijs, onder de vorming van een schil. De dikte van de schil neemt toe met de stollingstijd. Bij **wentelgieten** wordt de matrijs in alle richtingen gekanteld; hierdoor ontstaat een hol product. Na het bereiken van de gewenste wanddikte kan de rest van het vloeibare metaal worden uitgeschonken door de matrijs om te keren. Op deze manier is het mogelijk zonder kern holle gietstukken met een geringe wanddikte te maken. Dit proces is geschikt voor het maken van kleine series. De methode wordt gebruikt voor het maken van ornamenten, decoratieve voorwerpen en speelgoed uit legeringen met een laag smeltpunt, zoals zink-, tin- en loodlegeringen. Het is ook geschikt voor keramiek.

Centrifugaalgieten en rotatiegieten

Bij centrifugaalgieten en rotatiegieten wordt gebruikgemaakt van de middelpuntvliedende kracht om de binnenzijde van de matrijs met een laag vloeibaar metaal te bedekken. **Centrifugaalgieten** (zie figuur 3.33) wordt gebruikt voor het maken van cilindrische gietstukken, zoals pijpen en straat-



Figuur 3.33 Principe van het centrifugaalgietproces



Figuur 3.34 Schematische voorstelling van het rotatiegieten

lantaarns. Het vloeibare metaal wordt in een vorm gegoten die om een horizontale as draait. Zo worden gietstukken verkregen waarvan het binnenoppervlak altijd cilindervormig is. Het buitenoppervlak kan in doorsnede rond, vierkant of veelhoekig zijn. Op deze wijze worden voorwerpen met een diameter van 15 mm tot 3 m bij een lengte tot 15 m vervaardigd. De druk bij het centrifugaalgieten is afhankelijk van de rotatiesnelheid van de vorm. Voor dikwandige gietstukken is een hogere rotatiesnelheid nodig dan voor dunwandige gietstukken.

Rotatiegieten vindt plaats bij lagere snelheden dan centrifugaalgieten. Er worden rotatiesymmetrische producten mee vervaardigd, zoals een wiel met spaken (zie figuur 3.34). De techniek wordt behalve voor laagsmeltende metalen ook voor kunststoffen toegepast.

3.8 De keuze van de gietmethode

Inmiddels hebben we de belangrijkste vorm- en gietmethoden besproken. In deze paragraaf gaan we kort in op een aantal aspecten die de keuze van de gietmethode bepalen. Niet alleen technische overwegingen zoals vorm, afmetingen, oppervlaktegesteldheid en materiaalsoort spelen een rol, maar ook economische overwegingen. Wanneer op technische gronden verschillende alternatieven beschikbaar zijn, kiest men voor de oplossing met de laagste kosten voor gieten, nabewerken en eventueel niet-destructief onderzoek (zie paragraaf 12.9).

De factoren die een rol spelen bij de keuze van het gietproces zijn:
- de vereiste mechanische eigenschappen;
- de gewenste maatnauwkeurigheid en oppervlaktegesteldheid;
- de giettemperatuur van de toe te passen legering;
- de vorm en afmetingen (vooral de wanddikte) van het gietstuk;
- de grootte van de totaalserie en de fabricageseries;
- de gewenste levertijd van het eerste product;
- de noodzakelijke aanvullende bewerkingen en behandelingen.

Figuur 3.35 geeft een overzicht van de kenmerken van de belangrijkste gietprocessen. De mechanische eigenschappen van een gietstuk worden bepaald door de chemische samenstelling van de legering en door de afkoelsnelheid in de gietvorm. Een hogere

Aspecten	Zandvormen					Keramische vorm	Permanente vormen	
	kleigebonden vormzand			furaanzand	schaalvormen	verloren wasmodel methode	coquillegieten	spuitgieten
	handvormen	vormmachine	vormautomaat					
te gieten legering	staal, gietijzer, niet ijzer legeringen			staal, gietijzer, niet-ijzer legeringen		alle gietlegeringen	gietijzer, niet-ijzer met T_{sm}<1000°C	niet-ijzer legeringen met T_{sm}<900°C
grootte	klein tot groot	klein tot midden	klein tot midden	midden tot zeer groot	klein	klein	klein tot midden	klein tot midden
haalbare complexiteit	eenvoudig tot vrij hoog	middelmatig	middelmatig	vrij hoog	vrij hoog	zeer hoog	matig	hoog
haalbare detaillering	middelmatig	middelmatig	goed	laag	vrij hoog	zeer hoog	vrij hoog	zeer hoog
maatnauwkeurigheid	matig	middelmatig	middelmatig tot vrij goed	middelmatig	vrij goed	zeer goed	goed	zeer goed
haalbare ruwheid: R_a (µm)	12,5 - 25	12,5 - 25	6,3	12,5	3,2	1,6 - 3,2	3,2	0,8 - 1,6
nabewerking	matig	matig tot weinig	weinig	matig	weinig	geen of zeer weinig	weinig	geen of zeer weinig
minimum aantal	1	50	200	1	500	5	1000	5000
aanlooptijd (weken)	4 - 8	4 - 8	4 - 12	4 - 8	4 - 20	6 - 12	6 - 26	15 - 52

Figuur 3.35 Overzicht van kenmerken van een aantal vorm- en gietmethoden voor metalen

afkoelsnelheid levert een fijnere kristalstructuur op. De afkoelsnelheid in metalen vormen is groter dan die in zandvormen. Hierdoor ligt bijvoorbeeld de treksterkte van een aluminiumlegering bij zandgieten lager dan bij spuitgieten. Het is niet altijd goed mogelijk om twee gietprocessen te vergelijken. Voor spuitgieten gaat men bijvoorbeeld vaak uit van andere legeringen dan voor zandgieten.

De maatnauwkeurigheid en de oppervlaktegesteldheid spelen bij de uiteindelijke keuze van de vorm- en gietmethode eveneens een belangrijke rol. Als de maatnauwkeurigheid en oppervlaktekwaliteit van het gietstuk toenemen, zal de noodzaak tot nabewerking afnemen. Richtwaarden over de ruwheid van het oppervlak voor de diverse gietprocessen vind je terug in figuur 3.35. De gegevens uit deze figuur kun je gebruiken om een gietmethode te kiezen.

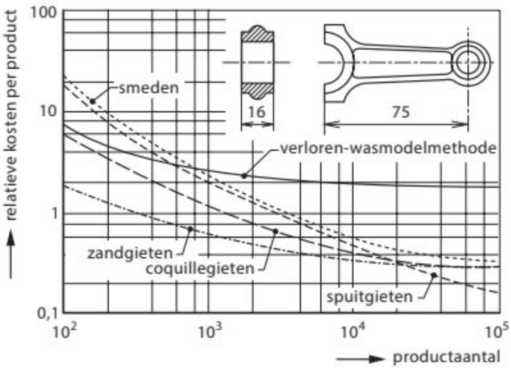
Gietijzer en gietstaal zijn eigenlijk alleen in zand of in keramische vormen te gieten vanwege de hoge giettemperatuur. De keuze hiertussen wordt in eerste instantie bepaald door het aantal te vervaardigen producten. Het aantal producten bepaalt immers of de gietvormen het beste handmatig, gedeeltelijk of volledig gemechaniseerd kunnen worden vervaardigd.

Naast de vorm en afmetingen (lengte, breedte en hoogte) zijn de maximale en minimale wanddikte van grote invloed op de keuze van de gietmethode. De minimum te gieten wanddikte wordt niet alleen bepaald door het proces, maar is ook afhankelijk van de gietlegering. In figuur 3.36 geven we voor vier materialen richtwaarden voor de minimaal te gieten wanddikte, afhankelijk van de gietmethode.

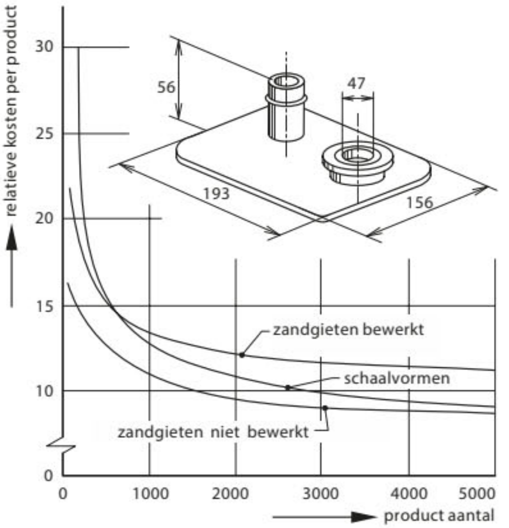
Het verband tussen het aantal te vervaardigen producten en de productiekosten gaven we in paragraaf 1.7.1 al kort weer. In hoofdstuk 17 behandelen we uitgebreid de kostprijsberekening. In vergelijking met geautomatiseerde processen zijn bij het handvormen de uitvoeringskosten hoog en de eenmalige kosten en kosten voor herhaalopdrachten

Gietmethode	Minimale wanddikte (mm)			
	zink	aluminium	magnesium	gietijzer
zandgieten	–	3	4	6
verloren-was	–	1 - 1,5	1 - 1,5	1 - 1,5
coquillegieten	–	2,5	3	–
spuitgieten	0,5 - 1	1 - 2	1,5 - 2	–

Figuur 3.36 Richtwaarden voor de minimale wanddikte



Figuur 3.37 Kosten van een onbewerkte drijfstang als functie van het aantal en de vervaardigingsmethode



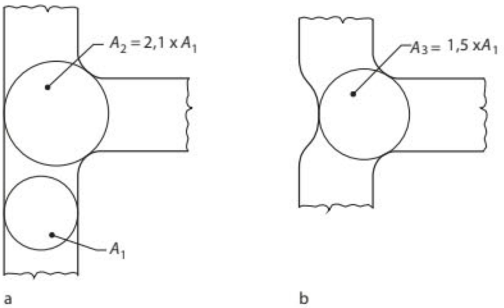
Figuur 3.38 Kostenvergelijking tussen zandgieten en schaalvormen; let op de invloed van verspanend bewerken

laag. In figuur 3.37 geven we een kostprijsvergelijking tussen vier gietmethoden en het smeden van een drijfstang. Zoals je ziet, is bij een totaalserie van circa 20.000 stuks spuitgieten de goedkoopste methode. Uit figuur 3.38 blijkt dat een op zichzelf duurdere gietmethode, schaalvormen, bij een betrekkelijk gering aantal gietstukken al economisch interessant is wanneer de nabewerkingskosten in de vergelijking worden betrokken.
Let op: bij een oppervlakkige beschouwing lijken de kosten per product in figuur 3.38 misschien veel sterker te dalen bij een toenemend productaantal dan in figuur 3.37. Beide figuren zijn echter niet op dezelfde schaal weergegeven.

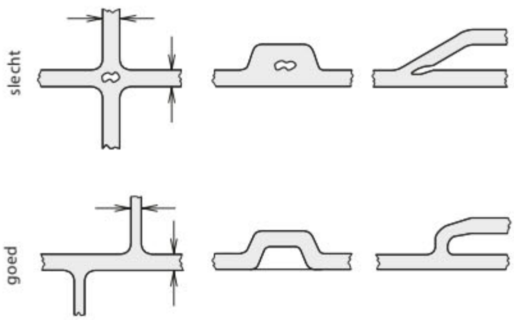
3.9 Richtlijnen voor het ontwerpen van gietwerk

In deze paragraaf geven we een beperkt aantal ontwerprichtlijnen voor het gieten in zand, voor coquillegieten en voor spuitgieten. Deze richtlijnen moeten leiden tot een ontwerp dat de gieterij in staat stelt een gaaf gietstuk (zonder gietfouten) tegen een lage kostprijs te vervaardigen. Het is helaas niet mogelijk om het ontwerpen van gietstukken in deze paragraaf uitvoerig te behandelen. Voor een juiste vormgeving van het gietstuk is het wenselijk dat er al in het ontwerpstadium overleg met de gieterij plaatsvindt. Dit geldt met name voor grootserie- en massafabricage.

In paragraaf 3.9.1 geven we algemeen toepasbare richtlijnen voor het ontwerpen van gietwerk. De richtlijnen in paragraaf 3.9.2 gelden voor coquillegieten en spuitgieten. In hoofdstuk 16 behandelen we richtlijnen voor productiegericht ontwerpen in het algemeen.



Figuur 3.39 Methode van de ingeschreven cirkel om de materiaalopeenhoping in een knooppunt te bepalen



Figuur 3.40 Voorbeelden van slechte en goede vormgeving van knooppunten en wanddikteovergangen

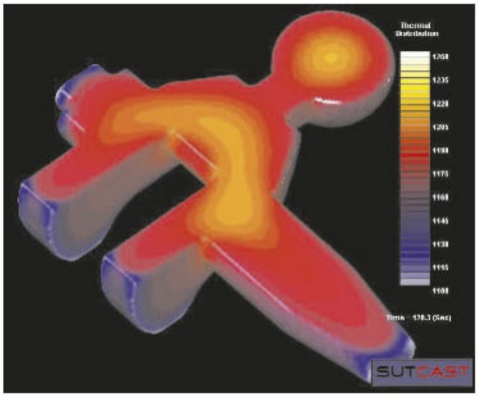
3.9.1 Ontwerprichtlijnen voor zandgietwerk

Twee belangrijke ontwerprichtlijnen voor zandgietwerk hebben te maken met het voorkomen van materiaalopeenhopingen en het beperken van krimpspanningen.

Voorkomen van materiaalopeenhopingen

De belangrijkste regel voor giettechnisch construeren luidt: voorkom **materiaalopeenhopingen** en construeer zo veel mogelijk in gelijke wanddiktes door het gehele gietstuk. Hiermee kun je poreusheid ten gevolge van slink voorkomen. Materiaalopeenhoping treedt op bij aansluiting van wanden (zie figuur 3.39). De materiaalopeenhoping is uit te drukken in het oppervlak *A* van de ingeschreven cirkel (zie figuur 3.39a). In figuur 3.39b is door een simpele aanpassing van de geometrie de materiaalopeenhoping in het knooppunt met 29% teruggebracht. Materiaalopeenhopingen worden vaak onvoldoende onderkend; de ontwerper houdt vaak geen rekening met de bewerkingstoeslag. In figuur 3.40 zie je een drietal voorbeelden van goede en slechte ontwerpen van knooppunten en wanddikteovergangen.

Materiaalopeenhopingen in een gietstuk zijn niet altijd te voorkomen. Door constructieve aanpassingen en giettechnische maatregelen (koelblokken en beter of slechter warmtegeleidende zandsoorten) kan men toch een gietstuk maken zonder poreusheid. Een gieterij komt vaak via trial-and-error tot een oplossing. Ervaring en intuïtie spelen hierbij een grote rol. Een belangrijk hulpmiddel voor het

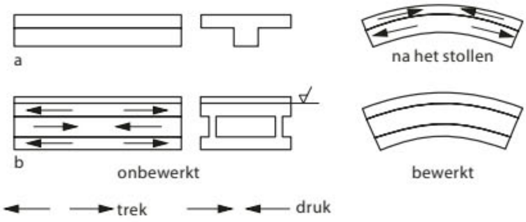


Figuur 3.41 Simulatie van de temperatuurverdeling in een gietstuk tijdens het stollen (SUTCAST)

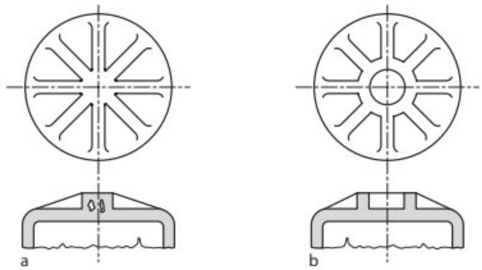
maken van porievrije gietstukken is het simuleren van het stollingsproces met behulp van speciaal daarvoor ontwikkelde computerprogramma's. Met die programma's kan men snel nagaan welke invloed een verandering van het ontwerp zal hebben op het stollingsgedrag. In figuur 3.41 zie je een voorbeeld van het resultaat van een dergelijke stollingssimulatie. Het effect van de krimp kan ook in een simulatie worden meegenomen.

Beperken van krimpspanningen

Materiaalopeenhopingen en ongelijke wanddiktes zorgen niet alleen voor poreusheid, maar zijn ook de oorzaak van **krimpspanningen**. Vooral bij ongelijke wanddiktes zullen krimpspanningen optreden als gevolg van verschil in afkoelsnelheid. Krimpspanningen kunnen vervorming van het gietstuk veroorzaken. Als delen van het gietstuk zo stijf zijn of de gietvorm zo sterk is dat er geen vervorming mogelijk is, dan kan er zelfs scheurvorming in het gietstuk optreden. In figuur 3.42a zie je een voorbeeld van de vervorming van een gietstuk met een T-vormige doorsnede als gevolg van de hogere afkoelsnelheid van het dunnere horizontale deel van de T. Verschil in afkoelsnelheid hoeft niet altijd tot vervorming van het gietstuk te leiden. Dit zie je terug in de symmetrische constructie van figuur 3.42b. Ook dit gietstuk is echter niet vrij van krimpspanningen. Bij het eenzijdig verspanend bewerken zal het alsnog vervormen.



Figuur 3.42 Vervorming van een gietstuk door krimpspanningen als gevolg van asymmetrische doorsnede (a) en als gevolg van verspanend bewerken (b)



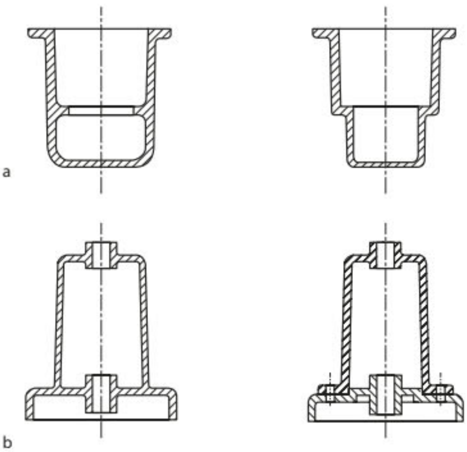
Figuur 3.43 Beperking van krimpspanningen en materiaalopeenhoping in een deksel (a) door wijziging van het ontwerp (b)

Krimpspanningen kunnen tot een minimum worden beperkt door zo veel mogelijk in gelijke wanddiktes te construeren, door voor geleidelijke wanddikteovergangen te zorgen en door een juist ontwerp van verstevigingsribben. Een juist ontwerp van een met ribben versterkte deksel van een vat (zie figuur 3.43) vermindert niet alleen de krimpspanningen, maar vermindert ook de materiaalopeenhoping in het deksel.

Krimpspanningen mogen niet te hoog zijn in verband met de mechanische belastbaarheid van een gietstuk. Ze kunnen tot een aanvaardbaar niveau worden teruggebracht door **spanningsarm gloeien**. Bij deze warmtebehandeling wordt het gietstuk, afhankelijk van de wanddikte en de vorm, gedurende enige uren op een temperatuur van 0,4 tot 0,5 maal de smelttemperatuur (in Kelvin) gebracht. Bij die temperatuur is plastische vervorming van het gietstuk mogelijk als gevolg van een daling van de rekgrens van het materiaal. Als het materiaal na het gloeien langzaam genoeg afkoelt, dan zullen de krimpspanningen niet hoger zijn dan de rekgrens van het materiaal die bij de gloeitemperatuur hoort. Er treden echter dus wel degelijk krimpspanningen op. De veelgebruikte term spanningsvrij gloeien is daarom onjuist.

3.9.2 Ontwerprichtlijnen voor coquillegieten en spuitgieten

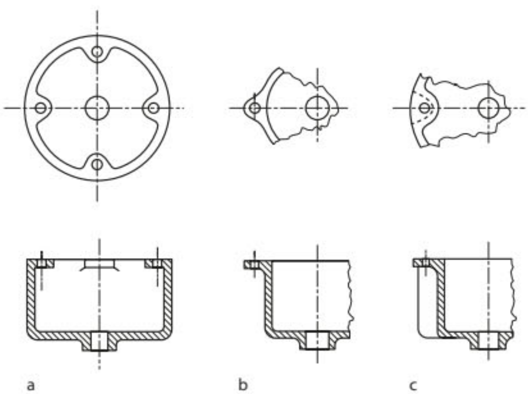
De afkoelsnelheid ligt bij coquillegieten en spuitgieten aanzienlijk hoger dan bij zandgieten. Bij coquillegieten en vooral bij spuitgieten is het daarom nog belangrijker om materiaalopeenhopingen te voorkomen dan bij zandgieten. Men moet zorgen voor gelijke wanddiktes en gelijkmatige wanddikteovergangen. Bij coquillegieten kan nog wel gebruik worden gemaakt van opkomers om poreusheid te voorkomen. Bij spuitgieten kan dit niet, waardoor materiaalopeenhopingen zonder meer poreusheid zullen veroorzaken. Het vermijden van poreusheid is bij spuitgietwerk dan ook moeilijk.



Figuur 3.44 Aanpassingen van twee ontwerpen (a, b) om ondersnijding te vermijden

Bij coquillegieten kunnen ondersnijdingen met behulp van zandkernen gerealiseerd worden. Bij spuitgieten zijn ondersnijdingen onmogelijk.
In figuur 3.44a wordt ondersnijding opgeheven door aanpassing van het ontwerp, terwijl dit in figuur 3.44b is gerealiseerd door het gietstuk uit twee delen te maken. Merk op dat oplossing b veel nauwkeurige bewerkingen vereist, en dus minder gewenst is. Andere mogelijkheden om ondersnijdingen te vermijden zie je in figuur 3.45: het naar buiten brengen van de ogen (b) en het toepassen van ogen met uitsparingen (c).

Bij spuitgieten wordt het gietstuk door middel van pennen uit de matrijs gestoten. Het gietstuk blijft altijd enigszins in de matrijs plakken en moet daarom met enige kracht uit de matrijs worden gedrukt. Tijdens het uitstoten is de temperatuur van het gietstuk nog betrekkelijk hoog en zullen de uitstootpennen een afdruk op het gietstuk achterlaten. Bij geringe wanddiktes zijn meestal plaatselijke wanddikteversterkingen (**uitwerpogen**) nodig die kunnen dienen als aangrijpplaats voor de uitstootpennen.



Figuur 3.45 Ontwerpvoorbeelden om ondersnijdingen (a) te vermijden (b, c)

Het is voor een ontwerper niet eenvoudig om al tijdens de ontwerpfase met alle giettechnische details rekening te houden. Daarom is overleg met de gieterij in een zo vroeg mogelijk stadium van het ontwerp noodzakelijk, zoals we eerder al aangaven. Dit overleg kan de kosten van het gietstuk tot een minimum beperken.

3.10 Vormgeven van kunststoffen

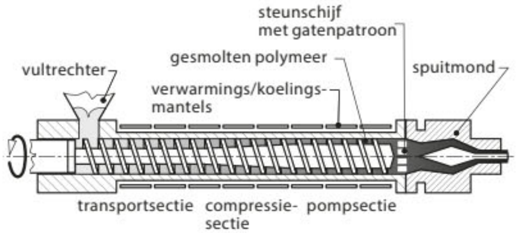
Verreweg de meeste vormgevingsprocessen van kunststoffen zijn onder te brengen in de hoofdgroep oervormen. Daarom behandelen we ze in dit hoofdstuk. Thermoplasten worden bijna altijd verwarmd tot in het viskeuze gebied, waarna de vormgeving plaatsvindt en men het materiaal laat afkoelen.
Bij thermoharders hardt een pasta-achtig mengsel door een chemische reactie uit in de eindvorm. Het materiaal verkrijgt hierbij een driedimensionale netwerkstructuur. De vormgevingsprocessen die in de rubbertoestand van het materiaal plaatsvinden, bespreken we in paragraaf 4.7.
In paragraaf 3.11 en 3.12 bespreken we de meest toegepaste vervaardigingsprocessen: extruderen en spuitgieten. In paragraaf 3.13 kijken we naar andere druk- en gietprocessen. In paragraaf 3.14 komt de fabricage van producten uit vezelversterkte kunststoffen aan de orde.

3.11 Extruderen en kalanderen

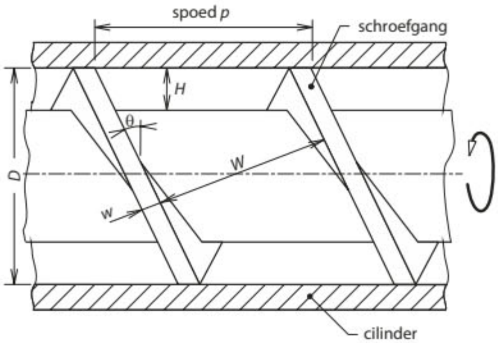
In deze paragraaf bespreken we allereerst het extrusieproces en varianten hierop. We sluiten deze paragraaf af met een bespreking van kalanderen.

3.11.1 Extrusieproces

Extruderen is een continu proces waarbij het materiaal wordt verhit tot in de viskeuze toestand en onder druk door een matrijsopening wordt geperst. Het proces is geschikt voor vrijwel alle thermoplas-



Figuur 3.46 Schematische voorstelling van het extrusieproces in een schroefextruder



Figuur 3.47 Geometrie van de extruderschroef

ten en elastomeren, maar niet voor thermoharders. Ook materialen met vezelversterking kunnen worden geëxtrudeerd, mits de vezels kort zijn. Het ontwerp van de extrusiemachine bij kunststoffen is wezenlijk anders dan bij extrusie van metalen (zie paragraaf 4.4.2). Dit komt doordat men bij kunststoffen uitgaat van granulaat of poeders. Figuur 3.46 geeft de doorsnede van een **schroefextruder** schematisch weer.

Het meest essentiële onderdeel van de extruder is de schroef of worm. Deze past in een cilinder waarvan de wand is voorzien van verwarmingselementen en koelkanalen. Hierdoor kan een bepaald temperatuurverloop ingesteld en gehandhaafd worden. De verhitting van de kunststof in de extruder vindt voor het grootste gedeelte plaats door middel van wrijving. De aandrijving van de schroef levert de hiervoor benodigde arbeid. Aan de ingangszijde van de schroef bevindt zich de vultrechter voor de toevoer van materiaal. Aan het andere uiteinde kan de smelt door een **spuitmond**, respectievelijk matrijs, de extruder verlaten om daarna gekoeld te worden. De schroefextruder transporteert, mengt, comprimeert en perst het viskeuze materiaal door de spuitmond. Doordat de schroefextruder zoveel verschillende functies heeft, zijn voor de diverse polymeren verschillende schroeven nodig. Iedere polymeer heeft immers een andere korrelgrootte, benodigde compressieverhouding, ander smeltgedrag, andere risico's voor thermische afbraak enzovoort. Bij moeilijk te extruderen polymeren, in het bijzonder bij moeilijk transporteerbare poeders, kan men ook kiezen voor een extruder met dubbele schroef.

De geometrie van de extruderschroef zie je in figuur 3.47. Behalve de binnendiameter D van de cilinder spelen de spoed p, de gangdiepte H, de gangbreedte W en de spoedhoek θ een rol. De binnendiameter van de cilinder varieert tussen de 25 mm en 150 mm, terwijl de lengte/diameterverhouding in het algemeen 25 is.

In de transportsectie wordt het granulaat aangevoerd en voorverwarmd. In de compressiesectie wordt de kunststof viskeus gemaakt en wordt de aanwezige lucht aan de smelt ontrokken, terwijl in de pompsectie de smelt wordt gehomogeniseerd en de druk verder wordt opgebouwd (zie figuur 3.46). Bij een schroef met constante spoed bepaalt het verloop van de gangdiepte over de lengte van de schroef het verloop van de druk in de extruder tussen de vultrechter en het uiteinde van de cilinder. Dit verloop van de gangdiepte is voor iedere kunststof verschillend.

Tussen de cilinder met de extruderschroef en de extrusiematrijs is een steunschijf ('*breaker plate*') met axiale gaten geplaatst (zie figuur 3.46). Deze dient ervoor om verontreinigingen uit de smelt te zeven en de druk op te bouwen. De extruderschroef brengt de kunststofsmelt in een roterende beweging. De steunschijf moet er vervolgens voor zorgen dat deze beweging in een rechte beweging wordt omgezet.

De netto volumestroom Q (in m^3/s) die een extruder levert, is opgebouwd uit een meestroomcomponent Q_{mee} als gevolg van de beweging van de roterende extruderschroef en een tegenstroomcomponent Q_{tegen} veroorzaakt door de tegendruk p bij de spuitmond van de extruder. In eerste benadering veronderstellen we dat de druk in de schroefextruder van nul bij de vultrechter lineair oploopt tot een maximale waarde aan het uiteinde van de cilinder. De meestroomcomponent Q_{mee} is afhankelijk van het toerental n van de extruderschroef en de geometrie van de schroef. De tegenstroomcomponent Q_{tegen} is een functie van de tegendruk p, de schroefgeometrie

en de viscositeit η van de smelt. In formulevorm geldt dus:

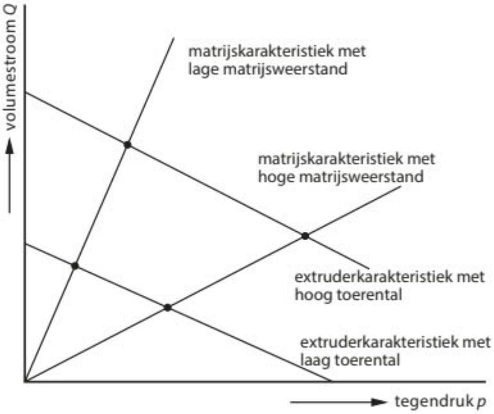
$$Q = Q_{mee} - Q_{tegen} = a \cdot n - b \cdot \frac{p}{\eta}$$

Deze formule geeft de **extruderkarakteristiek** weer. Als een extruder van een extrusiematrijs is voorzien, is de volumestroom Q_m door de matrijs gelijk aan:

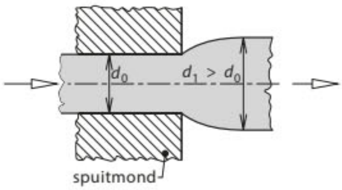
$$Q_m = c \cdot \frac{p}{\eta}$$

waarbij de constante *c* afhankelijk is van de geometrie van de schroef. Deze laatste vergelijking geeft de **matrijskarakteristiek** weer. In figuur 3.48 hebben we het **extrusiediagram** afgebeeld met een extruderkarakteristiek voor een laag en een hoog toerental. Daarnaast zie je hier een matrijskarakteristiek voor een lage en een hoge matrijsweerstand. Het snijpunt van de extruderkarakteristiek en de matrijskarakteristiek geeft het **werkpunt** in een gegeven situatie weer.

Na het verlaten van de spuitmond moet het materiaal zo snel mogelijk worden gekoeld met water of lucht. Daarna wordt het extrusieproduct op lengte afgekort. Bij elastomeren loopt het product door een vulkaniseerinrichting, bijvoorbeeld een buis gevuld met stoom, die achter de extruder met extrusiematrijs is geplaatst. Er moet extra aandacht aan de cilinderkoeling van de extruder besteed worden om voortijdige vulkanisatie te voorkomen. De vulkanisatiesnelheid moet aan de extrusiesnelheid worden aangepast.
Bij het verlaten van de matrijsopening treedt een spontane diktevergroting van de materiaalstreng op. Deze diktevergroting is een gevolg van elastische



Figuur 3.48 Extrusiediagram



Figuur 3.49 Die-swell

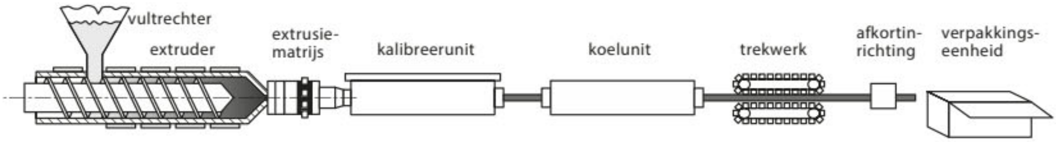


Figuur 3.50 Doorsnedeverandering bij extrusie

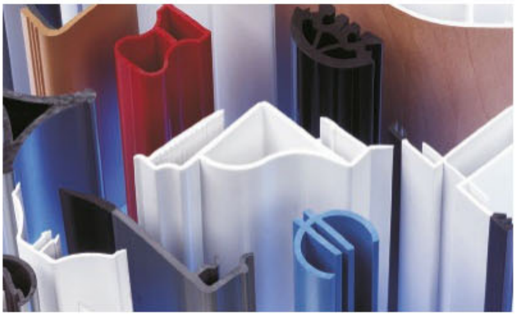
terugvering van het materiaal. We noemen deze elastische terugvering **die-swell** (zie figuur 3.49). Als de doorsnede van het te extruderen profiel niet rotatiesymmetrisch is, zal de die-swell er ook nog voor zorgen dat de vorm van het doorsnedeoppervlak verandert ('*back relieving*'). Figuur 3.50 laat zien hoe de doorsnede bij extrusie door een vierkante spuitmond vervormt en hoe men dit door een aanpassing van de spuitopening kan corrigeren. Een tweede gevolg van het visco-elastisch gedrag van de kunststof kan een **smeltbreuk** zijn. In het algemeen zal bij het opvoeren van de extrusiesnelheid de smelt minder stabiel worden. Als gevolg daarvan gaat het product vervormen en krijgt het een ruwer oppervlak ('*shark skin*'). Bij grote veranderingen in de extrusiesnelheid, vooral door niet-geleidelijke overgangen in de matrijs, kunnen de elastische vervormingen echter zo groot worden dat ze plaatselijk tot breuk leiden.

Voor de productie van buizen en profielen met een hoge maatnauwkeurigheid is een kalibreereenheid vereist. Na extrusie wordt de buis opgevangen in een iets wijdere, inwendig glanzend gepolijste cilinder. Door middel van luchtdruk of vacuüm wordt de kunststof gedwongen af te koelen tegen de wanden van de kalibreermatrijs. Figuur 3.51 laat een productielijn voor geëxtrudeerde halffabricaten zien, compleet met een kalibreerunit, een koelunit, een trekwerk voor de doorvoer van het materiaal en een afkortinrichting.

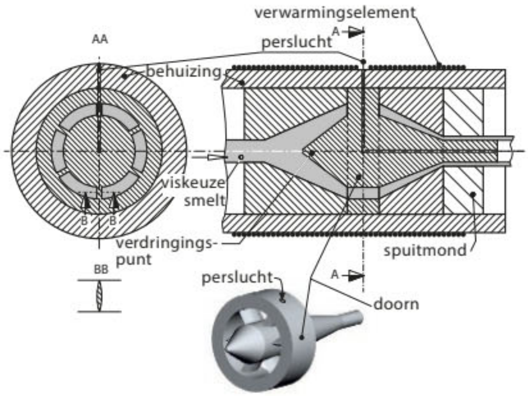
Met het extrusieproces kunnen op goedkope wijze veel verschillende producten (halffabricaten) vervaardigd worden: draad, staf, buis, slang, plaat, folie, profiel, kabelisolatie enzovoort. Ook kunnen



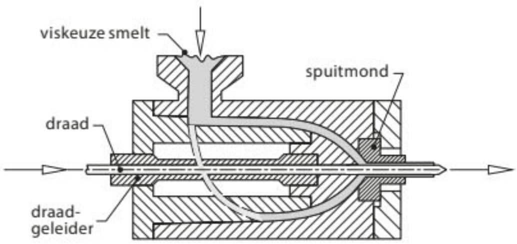
Figuur 3.51 Productielijn voor geëxtrudeerde halffabricaten



Figuur 3.52 Voorbeelden van geëxtrudeerde producten (Custom Made Profiles)



Figuur 3.53 Spuitmond voor de extrusie van buis



Figuur 3.54 Draadmantelextrusie met haakse extrusiekop

ingewikkelde profielen worden vervaardigd (zie figuur 3.52). Voorbeelden van dergelijke profielen zijn raamkozijnen, tochtstrips, wissellijsten, kabelgeleidingen, regenpijpen en dakgoten. De minimale wanddikte bedraagt 0,3 tot 0,4 mm.

Geëxtrudeerde profielen bevatten doorgaans aanzienlijke inwendige spanningen. Ook treedt er anisotropie van de mechanische eigenschappen over de doorsnede van het product op. Aan de spuitmond van de extrusiematrijs worden hoge eisen gesteld, omdat een beschadiging van de spuitmond strepen in de lengterichting op het product zal veroorzaken.

3.11.2 Varianten van het extrusieproces

In deze paragraaf bespreken we de volgende varianten van het extrusieproces: extrusie van buis, draadmantelextrusie, plaatextrusie en coëxtrusie.

Extrusie van buis

Voor het extruderen van buis is een ringvormige spuitmond nodig. Om de juiste buitendiameter te bereiken is een kalibreerinrichting of kalibreerbus vereist. **Buisextrusie** wordt toegepast voor buizen met relatief kleine wanddikten. De maximale extrusiesnelheid ligt rond 0,5 m/s. In figuur 3.53 hebben we het ontwerp van een spuitmond voor buis schematisch weergegeven. De binnendiameter van de buis wordt gerealiseerd door de smelt om een doorn te persen. Deze doorn is met relatief dunne vinnen (‘*spider legs*’) aan de doornhouder bevestigd.

Draadmantelextrusie

Een belangrijke toepassing van extrusie is het bekleden van metaaldraad en elektrische kabels met een kunststoflaag. Dit proces wordt **draadmantelextrusie** genoemd. De spuitmond is hierbij dwars op de extrusierichting geplaatst (zie figuur 3.54).

Plaatextrusie

Plaatextrusie vereist een brede spuitmond. De stroom gesmolten polymeer moet gelijkmatig worden verdeeld over de breedte van de spuitmond. Platen worden geëxtrudeerd tot breedten van maxi-

maal 3 à 4 m in dikten tot 50 mm. De snelheid van extruderen hangt af van de extrudeerbaarheid van de kunststof en bedraagt globaal 0,05 m/s.

Nadat de plaat de spuitmond heeft verlaten, kan het product met een walsinstallatie worden gekalibreerd en/of gekoeld. Zo nodig kan in de plaat een golfprofiel worden aangebracht door de nog warme plaat tussen twee geprofileerde rollen door te voeren.

In paragraaf 4.7 bespreken we extrusie gecombineerd met folieblazen en het extrusieblaasproces.

Coëxtrusie

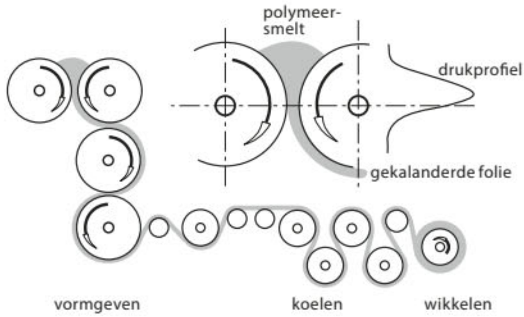
Coëxtrusie is op te vatten als het gelijktijdig uitvoeren van meerdere extrusieprocessen in een extrusiekop of spuitmond. Op die manier kan profiel, plaat of folie gemaakt worden dat opgebouwd is uit verschillende lagen kunststof, afkomstig uit verschillende extruders.

Met coëxtrusie kan door de gelaagde opbouw een product worden vervaardigd met een combinatie van eigenschappen die niet met één kunststof is te bereiken. Als er bijvoorbeeld eisen worden gesteld aan het uiterlijk en de oppervlaktekwaliteit van het product, kan men voor de buitenkant van het product een duurdere kunststof gebruiken dan voor het inwendige van het product. Ten behoeve van de levensmiddelenindustrie worden vaak folies met barrièrelagen vervaardigd om producten langer vers te houden. Overigens kunnen niet alle kunststoffen met elkaar gecombineerd worden. Dit hangt af van de onderlinge hechting en het verschil in verwerkingstemperatuur en viscositeit.

Als gevolg van de hoge matrijs- en machinekosten is coëxtrusie alleen geschikt voor massafabricage. Een voorbeeld van een gecoëxtrudeerd product is een tochtstrip die bestaat uit een flexibel en een stijf deel. Een ander voorbeeld is een fles voor motorolie met een smal doorzichtig strookje waardoor je kunt controleren hoeveel olie er nog in de fles zit.

3.11.3 Kalanderen

Een ander continu proces om folies en platen van praktisch onbegrensde lengte te vervaardigen is **kalanderen**. Dit proces wordt hoofdzakelijk toegepast bij de verwerking van rubberachtige thermo-



Figuur 3.55 Kalanderproces

plasten, bijvoorbeeld weekgemaakt PVC, kunstrubbers en thermoplastische elastomeren (zie paragraaf 2.4.2). Kalanderen is ook geschikt om tweezijdig een rubberen of thermoplastische laag aan te brengen op tape, papier of textiel; in feite gaat het hier om een vorm van coaten of impregneren.

Een kalanderlijn bestaat uit een aantal grote rollen. In eerste instantie vindt homogenisering en vormgeving plaats tussen verwarmde kalanderwalsen. Daarna wordt het materiaal afgekoeld op een aantal koeltrommels. Het kalanderproces is schematisch weergegeven in figuur 3.55. Het uitgangsmateriaal wordt als kunststofsmelt gemengd en gekneed aangevoerd via een transportband. Vervolgens wordt het tussen de rollen van de kalander meegenomen en in de kalanderspleet gestuwd. Door het steeds smaller worden van de spleet tussen de kalanderwalsen en de stroperigheid van de smelt stijgt de druk, totdat iets voor de smalste spleet een maximum bereikt wordt (zie figuur 3.55). De definitieve vormgeving vindt plaats tussen de laatste twee rollen waar het materiaal tussendoor geperst wordt. De gevormde folie wordt via een afnamerol naar de eerste koelrol overgebracht en daarna via meerdere koelrollen naar de opwikkeltrommel getransporteerd.

Als gevolg van de hoge viscositeit van de kunststofsmelt zijn de opgewekte drukken aanzienlijk. Bij het vervaardigen van PVC-folie van 250 mm breed en 0,050 mm (50 μm) dik is de resulterende kracht op de kalanderwalsen circa 2000 kN. Hierdoor zullen de rollen in het midden wat doorbuigen, waardoor de spleetafstand groter wordt. Dit leidt tot maatafwijkingen die ten opzichte van de geringe foliedikte al snel ontoelaatbaar groot worden. Deze problemen kunnen grotendeels worden voorkomen door de assen van de rollen elkaar onder een kleine hoek te

laten kruisen of door een compenserend buigmoment aan te brengen op de assen die aan weerszijden buiten de lagers doorlopen (zie ook figuur 4.4).

Ook de hechting van het materiaal aan de laatste rol leidt nogal eens tot moeilijkheden. Er is een aanzienlijke kracht – en dus een aanzienlijke rekspanning – nodig om de folie van de laatste rol te kunnen afnemen. In verband hiermee kunnen alleen polymeren met een uitgesproken rubbertraject op een kalander worden verwerkt. Thermoplasten met een uitgesproken rubbertraject zijn PVC, PS en ABS.

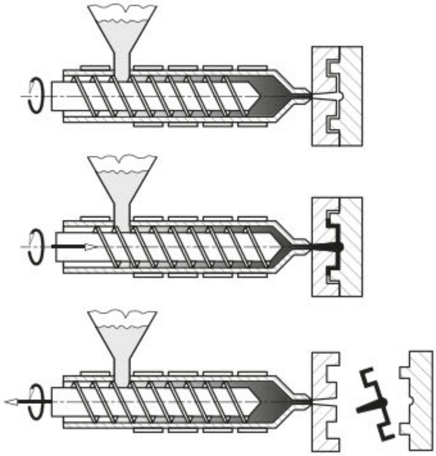
De investering voor een kalanderlijn is hoog, maar de productiesnelheden liggen met circa 2,5 m/s ook hoog. Met het proces is een goede oppervlaktekwaliteit haalbaar. Men kan hiermee folie met een goed constante en nauwkeurige dikte vervaardigen. Meestal gaat het om foliedikten tussen de 0,3 mm en 1 mm, bij een breedte tot 3 m. Kunststofproducten vervaardigd met het kalanderproces zijn PVC vloerbedekking, douchegordijnen, vinyl tafellakens en opblaasbare boten. Gekalanderd rubber wordt onder andere toegepast in autobanden en transportbanden.

3.12 Spuitgieten van kunststoffen

In deze paragraaf bespreken we het spuitgietproces en varianten hierop.

3.12.1 Spuitgietproces

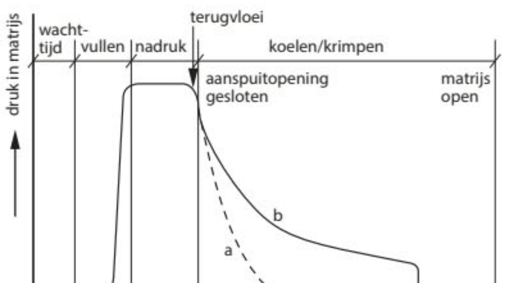
Het spuitgietproces is een van de belangrijkste processen voor het maken van producten uit kunststof. **Spuitgieten** is zelfs het meest toegepaste proces bij de verwerking van thermoplasten. Het uitgangsmateriaal wordt in dit geval in het algemeen in vaste vorm (granulaat) aangevoerd. Het granulaat wordt vanuit een vultrechter met behulp van een schroefplunjer verplaatst binnen een cilinder. Onderweg wordt het door de ontwikkelde wrijvingswarmte en via elektrische verwarmingselementen rond de cilinderwand verhit en gesmolten (zie figuur 3.56). In eerste instantie is het toevoerkanaal naar de matrijsholte gesloten. De schroef blijft roteren en materiaal naar voren transporteren en drukt daarbij zichzelf achteruit. Als er voldoende materiaal is geplastificeerd en gehomogeniseerd wordt het toevoerkanaal naar de



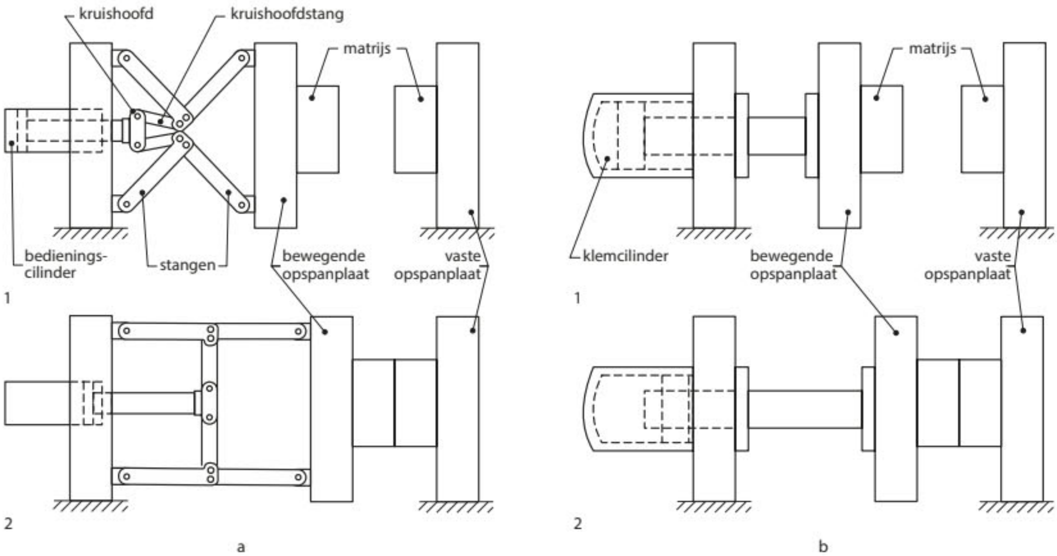
Figuur 3.56 Principe van het spuitgieten van kunststoffen

matrijs geopend en wordt de matrijsholte onder hoge druk gevuld door de schroef als plunjer te laten fungeren. De inspuitdruk is sterk afhankelijk van het werkstukmateriaal, de geometrie en de verhouding tussen de productlengte en de productdikte, en ligt tussen de 20 en 200 MPa. Om de matrijs tijdens het vullen gesloten te kunnen houden, moet de spuitgietmachine een forse sluitkracht leveren. De meest gangbare machines hebben een sluitkracht van 200-50.000 kN.

De matrijs wordt bij de verwerking van thermoplasten met water of olie gekoeld. Tijdens de eerste fase van het afkoelingsproces wordt er nog nagedrukt om de krimp op te vangen, terwijl de buitenste laag van het product al stolt. Wanneer de aanspuitopening wordt gesloten, of 'dichtvriest' door stolling, daalt de druk in de matrijsholte. Omdat kunststof-



Figuur 3.57 Drukverloop in een spuitgietmatrijs tijdens een productiecyclus



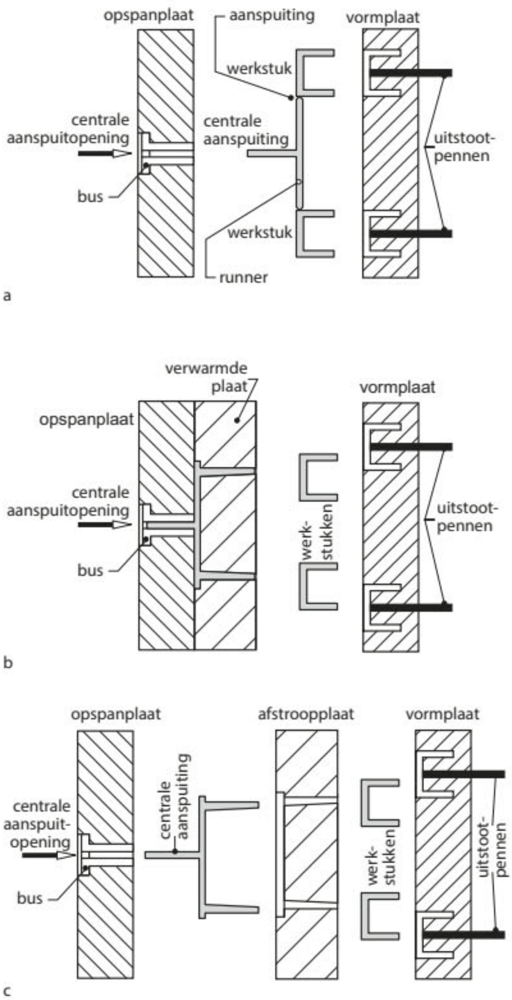
Figuur 3.58 Sluitmechanismen van een spuitgietmachine met kniehefboom (a) en hydraulische cilinder (b), in open toestand (1) en gesloten toestand (2)

fen slechte warmtegeleiders zijn, is het grootste gedeelte van de cyclustijd nodig voor afkoeling van het product. In figuur 3.57 hebben we het drukverloop in een spuitgietmatrijs tijdens een productiecyclus weergegeven. De snelle daling bij kromme a duidt op een grote krimp. Bij kromme b is de nadruk te hoog en te lang geweest.

Matrijzen voor het spuitgieten van producten uit kunststof komen in grote lijnen overeen met die voor het spuitgieten van metalen (zie paragraaf 3.7.3). Ze worden uitgevoerd met een systeem om het product te koelen met behulp van water, dat via een aantal koelkanalen door de matrijs loopt, en met uitstootpennen om het product uit de matrijs te verwijderen. Ook worden indien nodig verplaatsbare metalen kernen in het ontwerp opgenomen om holle ruimten in het product uit te sparen.
Meestal is de matrijs opgebouwd uit een opspanplaat aan de aanspuitzijde en een vormplaat aan de uitwerpzijde. Deze platen zijn bevestigd aan het sluitmechanisme van de spuitgietmachine, meestal een kniehefboommechanisme of een hydraulische cilinder (zie figuur 3.58). Wanneer de matrijs is uitgevoerd met een vormholte voor één werkstuk noemt men dat een enkelvoudige matrijs. Meervoudige matrijzen zijn geschikt voor het spuitgieten van meerdere werkstukken in één 'shot'. Kunststof doppen voor flessen worden bijvoorbeeld met 128 stuks per 'shot' vervaardigd.

De benodigde sluitkracht is gelijk aan het product van de inspuitdruk en het geprojecteerde oppervlak van het aantal te vervaardigen werkstukken, vermeerderd met een toeslag voor de toevoerkanalen van de smelt en enige reserve.

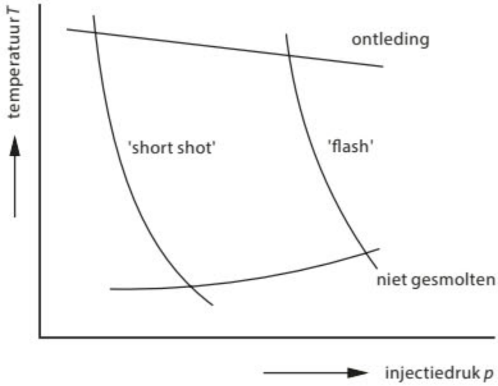
Vanuit de spuitmond wordt de smelt via toevoerkanalen naar de vormholten getransporteerd. Deze toevoerkanalen noemt men in het algemeen **runners**. Men maakt hierbij onderscheid tussen matrijzen met runners, die niet verwarmd zijn en waarin de smelt dus afkoelt ('*cold runners*') en verwarmde runners ('*hot runners*'). Bij onverwarmde runners stolt het achtergebleven materiaal. Dit dient na het uitstoten als afval te worden verwijderd. Bij verwarmde runners blijft het materiaal in de runners viskeus. Bij de volgende cyclus wordt dit materiaal in de vormholten gespoten. Een complexere constructie is een matrijs met een extra afstroopplaat. Het voordeel hiervan is dat de smelt centraal wordt aangespoten in plaats van vanuit de zijkant van de vormholte. Bovendien worden de gestolde runners (afval) en de werkstukken hierbij automatisch van elkaar gescheiden, via de twee openingen tussen de drie platen. Figuur 3.59 laat het principeverschil zien tussen een matrijs met twee en drie platen, alsmede het verschil tussen onverwarmde en verwarmde runners.



Figuur 3.59 Typen matrijzen voor spuitgieten:
a: matrijs met twee platen en onverwarmde runners
b: matrijs met twee platen en verwarmde runners
c: matrijs met drie platen

De belangrijkste procesbegrenzingen worden gevormd door de temperatuur *T* en de druk *p*, zoals het **spuitgietdiagram** in figuur 3.60 laat zien. Bij een te lage temperatuur is het materiaal te weinig viskeus, bij een te hoge temperatuur ontleedt het, bij een te lage inspuitdruk wordt de matrijsholte onvolledig gevuld en bij een te hoge druk worden de matrijshelften te veel uit elkaar gedrukt, zodat een braam of vlies op het werkstuk ontstaat.

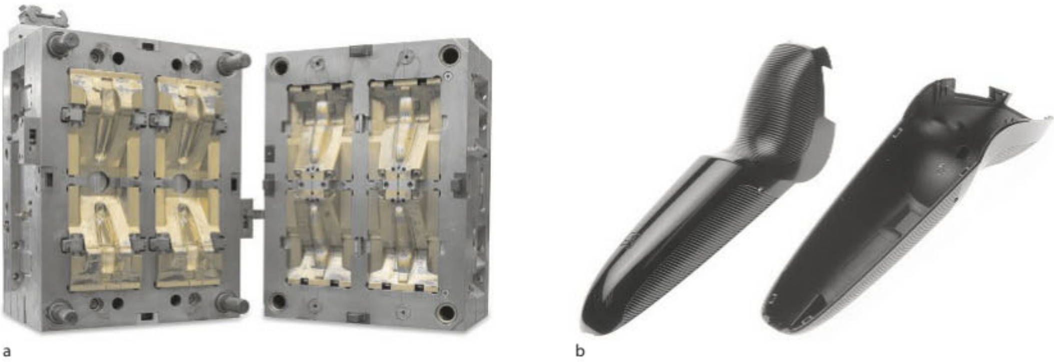
Vanwege de relatief hoge viscositeit (zie paragraaf 2.4.3) van de kunststofsmelt is de inspuitdruk hoger



Figuur 3.60 Spuitgietdiagram

dan bij het spuitgieten van metaal. Hierdoor wordt bij kunststof een minder scherpe aftekening van de matrijs verkregen en kunnen minder scherpe wanddikteovergangen worden gerealiseerd. De **vloeiweg-verhouding** geeft een kwantificeerbare indruk van de vormgevingsmogelijkheden. Dit is het quotiënt van de weg die een materiaaldeeltje vanaf de spuitmond aflegt en de dikte van het stromingskanaal, c.q. de wanddikte van het product. Voor zeer goed vloeibare thermoplasten is de vloeiwegverhouding maximaal gelijk aan 300. Simulatietechnieken geven overigens een beter beeld van het vloeigedrag. Spuitgietproducten uit kunststof en uit metaal hebben globaal dezelfde kenmerken: ze zijn vaak vrij complex, hebben een geringe wanddikte, een hoge maatnauwkeurigheid en een glad oppervlak. Vanwege dure matrijzen en hoge inrichtkosten is het proces vooral geschikt voor grootserie- en massafabricage. Figuur 3.61 laat een productvoorbeeld zien.

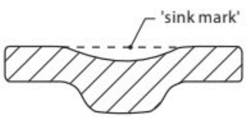
Bij afkoeling treedt krimp van het product op. Bij een drukloos stollingsproces is het volumeverschil 10 à 20%, maar omdat tijdens het spuitgietproces na het vullen van de matrijs nog wordt nagedrukt, wordt de uiteindelijke krimp in belangrijke mate gecompenseerd. Terwijl de buitenste lagen al stollen en krimpen wordt geleidelijk nog extra smelt in de matrijsholte geperst tot de aanspuitopening wordt afgesloten of ‘dichtvriest’. Bij amorfe thermoplasten ligt de uiteindelijke krimp tussen 0,3 en 0,7%, en bij kristallijne polymeren tussen de 1 en 4%. Vulmiddelen in kunststoffen zorgen in het algemeen voor een geringere krimp. Krimp leidt zowel tot maatafwijkingen als tot vormafwijkingen. Als gevolg van het stollingsproces in de matrijs ontstaan inwendige spanningen, die in het ongun-



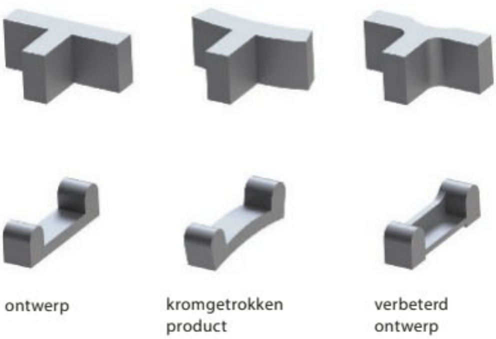
Figuur 3.61 Spuitgietmatrijs (a) en bijbehorend product: de behuizing van het Philips-scheerapparaat (b)

stigste geval tot scheurvorming kunnen leiden. Bij dikteverschillen in het werkstuk treedt ongelijkmatige krimp op, waardoor het werkstuk de neiging heeft te vervormen. Bij een grotere wanddikte moet er meer warmte naar de matrijs worden afgevoerd en krimpt het materiaal in dikte meer. Hierdoor kunnen plaatselijk inzakkingen ('*sink marks*') ontstaan (zie figuur 3.62).

Een ontwerper dient zich bewust te zijn van de optredende maat- en vormafwijkingen en hiervoor te compenseren. Figuur 3.63 toont een constructieve oplossing om het kromtrekken van producten tot een minimum te beperken.



Figuur 3.62 'Sink mark' als gevolg van ongelijkmatige krimp



Figuur 3.63 Aanpassing van het ontwerp om kromtrekken tegen te gaan

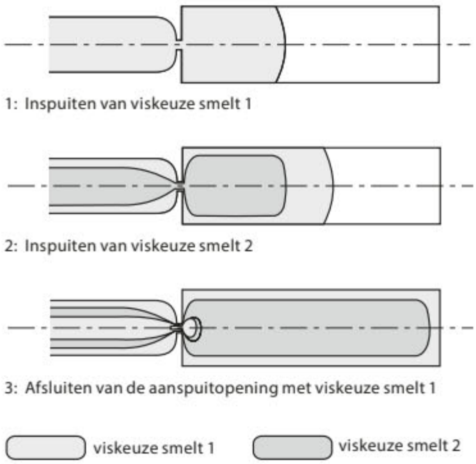
Het beschreven spuitgietproces kan in principe met thermoplasten, elastomeren en thermoharders worden uitgevoerd. Zoals gezegd worden bij thermoplasten de producten gekoeld met behulp van water dat via een aantal koelkanalen door de matrijs loopt. Bij thermoharders wordt daarentegen van niet-uitgehard granulaat uitgegaan. De matrijzen worden hierbij tot circa 200 °C verwarmd om het polymerisatieproces in de matrijs te laten plaatsvinden. Elastomeren, waaronder siliconen, worden via verwarming in de spuitgietmatrijs gevulkaniseerd. Net als bij het spuitgieten van metalen (zie paragraaf 3.7.3) kunnen metalen inserts in de producten worden opgenomen. Men noemt dit '*insert moulding*'.

3.12.2 Varianten van het spuitgietproces

In deze paragraaf bespreken we de volgende varianten van het spuitgietproces: meercomponentenspuitgieten, spuitgieten met gasinjectie, spuitgieten van schuimmaterialen en reactiespuitgieten.

Meercomponentenspuitgieten

In de praktijk is het vaak aantrekkelijk om producten en productonderdelen te vervaardigen met een combinatie van verschillende materiaaleigenschappen. Denk bijvoorbeeld aan productonderdelen met een 'soft-touch' oppervlak of juist een slijtvast oppervlak. Maar ook bij werkstukken met significante verschillen in stijfheid, wrijvings- en slijtagegedrag of een combinatie van gerecyclede en niet-gerecyclede kunststof speelt dit een rol. Dit laatste speelt bijvoorbeeld een rol bij direct contact met bepaalde



Figuur 3.64 Principe van 2K-spuitgieten

voedingsmiddelen, waarbij het gebruik van gerecyclede kunststof niet is toegestaan.

Met **meercomponentenspuitgieten** kunnen meerdere verschillende kunststofcomponenten binnen dezelfde productiecyclus verwerkt worden. Op deze manier ontstaat een combinatie van uiteenlopende materiaaleigenschappen. De oudste vorm van meercomponentenspuitgieten is **2K-spuitgieten** (met twee componenten), waarbij de kern en de buitenzijde van werkstukken uit verschillende materialen bestaan. Het principe van het proces, ook wel *'sandwich moulding'* of 'co-injectie' genoemd, is schematisch in figuur 3.64 weergegeven.

Tegenwoordig is het aantal toepassingen van het spuitgietproces waarbij verschillende polymeren in één en dezelfde matrijs worden verwerkt, sterk toegenomen. Op deze wijze kunnen scharnierende werkstukken direct worden gemaakt en kunnen verbindingen tussen productonderdelen tot stand gebracht worden. Bij het gebruik van verschillende polymeren wordt dit '*overmoulding*' genoemd. Wanneer de verschillende scharnieronderdelen uit dezelfde kunststof worden vervaardigd, spreekt men van '*ice-cold moulding*'. Hierbij worden koelelementen met een temperatuur van circa 0 °C gebruikt. Er is maar één machine voor nodig, weliswaar met meerdere inspuitunits, en één – zij het complexere – matrijs. Het belangrijkste voordeel van meercomponentenspuitgieten is dat men veel kan besparen op assemblagehandelingen. In figuur 3.65



Figuur 3.65 Behuizing handgereedschap vervaardigd met 3K-spuitgieten (Directindustry)

zie je de behuizing van een handgereedschap dat met 3K-spuitgieten (met drie componenten) in één productiecyclus is vervaardigd.

Spuitgieten met gasinjectie

Spuitgieten met gasinjectie kan gezien worden als een variant op het 2K-spuitgieten. De eerste component is hierbij een thermoplast en de tweede component een gas, meestal stikstof. Door gaskanalen in constructies aan te brengen, kunnen holle en daardoor relatief lichte werkstukken met een relatief hoge stijfheid worden vervaardigd. Bovendien zijn door de relatief dunne wanden de cyclustijden korter. Dit heeft een gunstige invloed op de kostprijs. Met gasinjectietechnologie kunnen 'sink marks' bij producten met wanddikteverschillen worden vermeden. Ook ontstaan er minder spanningen in het product, met minder vervorming als gevolg. Recent is men begonnen om in plaats van met gasinjectie met waterinjectie te werken. Figuur 3.66 laat twee voorbeelden zien van handgrepen vervaardigd door spuitgieten met gasinjectie, waarvan één met metalen inserts.



Figuur 3.66 Handgrepen vervaardigd door spuitgieten met gasinjectie (Aki Technical Moulding)

Spuitgieten van schuimmaterialen

Een andere variant van spuitgieten is het vervaardigen van producten met een schuimstructuur. Bij dit **spuitgieten van schuimmaterialen** of 'schuimspuiten' gaat men uit van thermoplasten in combinatie met een chemisch of fysisch schuimmiddel. Chemische schuimmiddelen worden aan de smelt toegevoegd en vormen boven een bepaalde temperatuur (boven het kookpunt van het schuimmiddel) via een chemische reactie een gas. Dit zorgt voor een homogene verdeling van vele kleine belletjes in het eindproduct. Bij fysisch schuimen wordt CO_2 of N_2 in de smelt geïnjecteerd. Op deze wijze kunnen met minimale krimp producten met een lage soortelijke massa vervaardigd worden. Zeer grote vormstukken zijn mogelijk, omdat de inspuitdruk en de sluitkracht beduidend lager zijn dan bij conventioneel spuitgieten. Vaak wordt gebruikgemaakt van het gastegendrukprincipe om een slechte oppervlaktekwaliteit met schuimblaasjes aan het oppervlak te vermijden. Dit principe houdt in dat door gasdruk in eerste instantie de schuimvorming wordt voorkomen, totdat aan de wand een massieve oppervlaktehuid is gevormd. Daarna expandeert het gas en krijgt het materiaal in de kern van het product toch nog een schuimstructuur.

Reactiespuitgieten

Bij **reactiespuitgieten** of '*reaction injection moulding*' (RIM) vindt het polymerisatieproces van de kunststof in de spuitgietmatrijs zelf plaats. Dit betekent dat een monomeer en één of meerdere reactieve vloeistoffen in de machine worden gemengd. Daarna wordt het mengsel door middel van een pomp met grote snelheid in de verwarmde matrijs gespoten, waarna het product in de vormholte ontstaat door polymerisatie. De inspuitdruk ligt met 10 à 20 MPa beduidend lager dan bij een spuitgietmachine met schroefplunjer. Het proces is zowel geschikt voor thermoplasten (nylon) als voor thermoharders (polyurethaan, epoxyhars). Ook werkstukken uit polyurethaan schuim kunnen met het RIM-proces worden vervaardigd. De cyclustijd is relatief lang, rond 10 minuten. Voorbeelden van producten die op deze wijze worden vervaardigd, zijn autobumpers, stuurwielen, thermische isolatie voor koelkasten en waterski's.

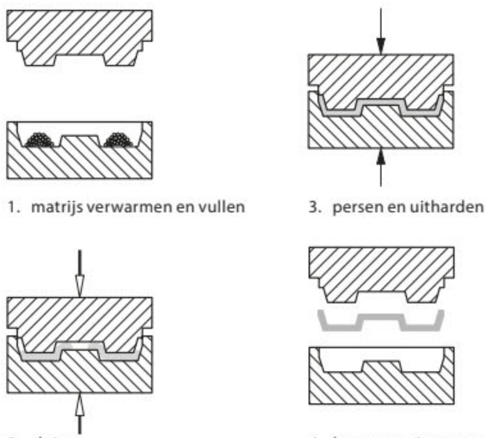
3.13 Andere druk- en gietprocessen voor kunststoffen

In deze paragraaf bespreken we de volgende druk- en gietprocessen voor kunststoffen: persen (zowel warm als koud), handmatig gieten en rotatiegieten.

Persen

Warm- en koudpersen wordt voornamelijk met thermohardende kunststoffen uitgevoerd. Bij **koudpersen** wordt in een geopende matrijs een afgepaste hoeveelheid vloeibare kunststof (hars) gebracht. Deze kunststof is gemengd met een harder of versneller, in sommige gevallen samen met een vezelwapening in de vorm van matjes. Door de bovenmatrijs ten opzichte van de ondermatrijs te verplaatsen wordt het uitgangsmateriaal in de gewenste vorm geperst met een druk van 3-20 MPa. De kunststof hardt uit door polymerisatie, eventueel in een licht verwarmde matrijs. Een belangrijk nadeel van koudpersen is de lange cyclustijd. Deze kan variëren van circa 6 tot 30 minuten en is afhankelijk van de gebruikte hars en de afmetingen van het werkstuk. Voorbeelden van met deze techniek gemaakte producten zijn in kleine series vervaardigde bootrompen en bassins.

Warmpersen (zie figuur 3.67) is vergelijkbaar met koudpersen. Bij warmpersen gaat men echter meestal uit van een voorverwarmd poeder dat in de matrijs verder wordt verhit. Het proces wordt uitgevoerd met thermoharders met of zonder vezelversterking, met elastomeren en in een enkel



Figuur 3.67 Principe van het warmpersen

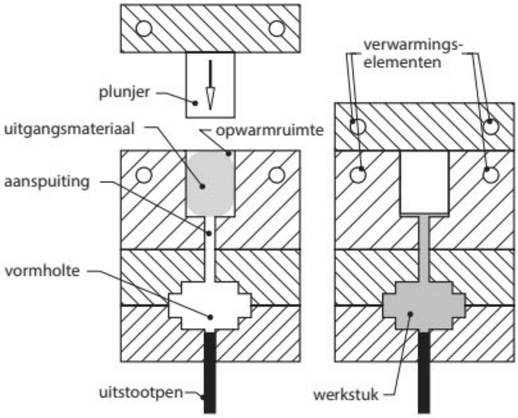
geval met thermoplasten (onder andere voor het persen van grammofoonplaten). Nadat de matrijsholte onder druk gevuld is, hardt het materiaal uit door polymerisatie of afkoeling. De persdrukken liggen tussen 10 en 150 MPa. Omdat warmpersen bij een temperatuur van 100 tot 160 °C plaatsvindt, is de cyclustijd beduidend korter (0,5 à 5 minuten) dan bij koudpersen. Met warmpersen kunnen complexere producten worden vervaardigd dan met koudpersen, maar minder complexe producten dan met spuitgieten. De maatbeheersing is beter dan bij spuitgieten en werkstukoppervlakken tot 2,5 m^2 zijn mogelijk. Plastic borden, deurkrukken en roerwerken van wasmachines zijn voorbeelden van warmgeperste producten.

Een variant op het conventionele warmpersen is het **transfer moulding-proces** (zie figuur 3.68). Hierbij wordt het nog niet uitgeharde materiaal in een aparte ruimte voorverwarmd tot het viskeus is. Daarna wordt het met behulp van een plunjer in de matrijsholte gespoten. Dit gebeurt bij drukken tot 300 MPa. Door wrijving neemt de temperatuur van de smelt toe. Het materiaal homogeniseert verder en hardt vervolgens in de matrijs uit. Bij transfer moulding is de cyclustijd korter dan bij conventioneel warmpersen. Het proces is in het bijzonder geschikt voor producten met complexe vormen en variërende wanddikte, waaronder elektrische connectors, elektronische componenten en rubberen en siliconen onderdelen.

Handmatig gieten

Handmatig gieten is mogelijk met thermoplasten, maar wordt het meest toegepast met thermoharders. Alleen laagviskeuze kunststoffen kunnen handmatig worden gegoten. Bij thermoharders wordt de polymerisatie in werking gezet door harders, versnellers en katalysatoren. De warmte die vrijkomt bij de uitharding moet tijdig via de gietvorm worden afgevoerd, omdat anders ontleding kan optreden. Dit beperkt de toe te passen wanddikte.

Thermohardende kunststoffen, zoals polyester- en epoxy-gietharsen, leveren slijtvaste producten op. De harsen worden vaak nog van vulmiddelen of vezelversterking voorzien, bijvoorbeeld van glasvezels. Epoxy-gietharsen worden veel toegepast voor het ingieten van elektrotechnische onderdelen zoals spoelen en transformatoren.

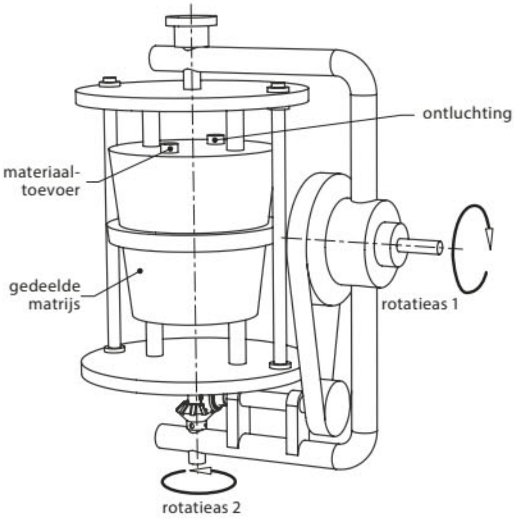


Figuur 3.68 Principe van transfer moulding

Een variant op het handmatig gieten is **dompelen**, waarbij het product ontstaat door een matrijs met de vorm van het product in een bad met vloeibaar materiaal onder te dompelen. Na een bepaalde periode wordt de matrijs weer uit het bad gehaald. Op de matrijs heeft zich inmiddels een laag viskeus materiaal gevormd. Na stolling (afkoeling), en in het geval van elastomeren na de vorming van een vernette structuur, kan het eindproduct zonder naden of aansluitpunten van de matrijs worden gestroopt. Dit proces wordt toegepast met thermoplasten (onder andere PVC) en elastomeren (onder andere neopreen en latex) en is geschikt voor wanddikten variërend van 0,1 mm tot 8 mm. Er worden bijvoorbeeld rubberen handschoenen, ballonnen, condooms en balgen mee vervaardigd.

Rotatiegieten

Het rotatiegieten van kunststoffen verschilt weinig van het rotatiegieten voor metalen (zie paragraaf 3.7.4) en is alleen geschikt voor laagviskeuze kunststoffen. Bij **rotatiegieten** wordt een verwarmde dunwandige metalen gietmatrijs geroteerd om twee onderling loodrechte assen (zie figuur 3.69). Het proces wordt vooral met thermoplasten (HDPE en PP) uitgevoerd, maar is in principe ook geschikt voor elastomeren en thermoharders. Meestal gaat men uit van een poedervormig materiaal, waaraan bij thermoharders een harder is toegevoegd. Door rotatie vormt het product zich tegen de verwarmde matrijswand. Na afkoeling kan het uit de gedeelde matrijs worden genomen.



Figuur 3.69 Rotatiegietmachine

Dit proces is geschikt voor complexe holle producten met wanddikten vanaf 0,4 mm; wanddikten groter dan 15 mm zijn zeldzaam. Bij rotatiegieten moet met wanddiktevariaties tot 5% worden gerekend. Maatafwijkingen tot 5% kunnen ontstaan als gevolg van een ongelijkmatige temperatuurverdeling in het materiaal tijdens het roteren en als gevolg van een afkoelsnelheid die niet altijd nauwkeurig te reproduceren valt.

Rotatiegieten wordt toegepast voor kleine series van producten met relatief grote afmetingen. Het is niet geschikt voor massafabricage van kleine voorwerpen. De cyclustijden liggen tussen 3 en 40 minuten. Alleen het buitenoppervlak van de werkstukken is redelijk glad. Voorbeelden van rotatiegegoten producten zijn vaten, vuilnisbakken, verplaatsbare wc-cabines en dieseltanks voor autobussen en vrachtwagens.

3.14 Vormgeven van vezelversterkte kunststoffen

Vezelversterkte kunststoffen kunnen op verschillende manieren worden vormgegeven: door handlamineren en sproeilamineren, persen, wikkelen, pultrusie, pulforming en door impregneren onder druk.

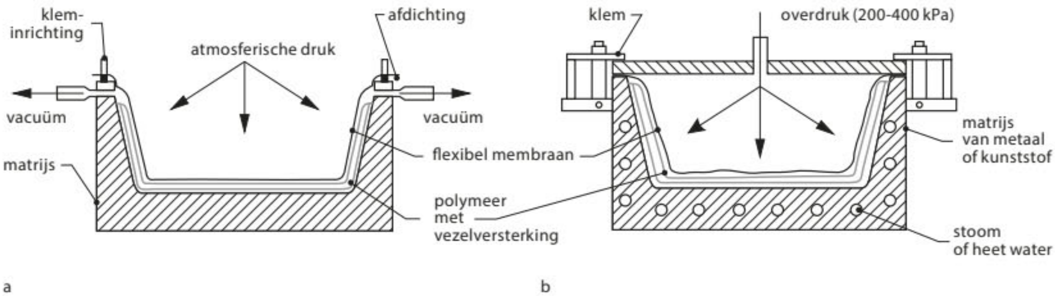
Handlamineren en sproeilamineren

De eenvoudigste methode voor de vormgeving van vezelversterkte thermoharders is het **handlamineren**. Het oppervlak van een open mal wordt hierbij eerst van een losmiddel voorzien, waarna handmatig een vloeibare polyester buitenlaag wordt opgebracht. Na uitharding geeft deze laag de kleur en uitstraling aan het eindproduct. Vervolgens worden een aantal lagen in hars gedrenkt glasvezelweefsel opgebracht. Tussendoor wordt de lucht met een roller uit de matten van vezeldoek gedrukt. Na het uitharden van de hars wordt het laminaat uit de mal genomen.
Bij **sproeilamineren** wordt de hars met een spuitpistool opgebracht. Hierbij kunnen ook vezels met een lengte van 25-75 mm met de vloeibare hars worden meegespoten.
De mallen zijn van vezelversterkte kunststof, aluminium of staal. Sproeilamineren wordt gebruikt voor producten met relatief grote afmetingen, zoals rompen van boten, zwembaden en opslagtanks. Deze producten worden doorgaans in kleine series gemaakt en kunnen van inserts worden voorzien.

Persen

Bij het warmpersen en transfer moulding (zie paragraaf 3.13) van vezelversterkte kunststoffen gaat men uit van een bulk-moulding compound, een thick-moulding compound of van een sheet-moulding compound (zie paragraaf 2.6). Een bulk-moulding compound (BMC) is een deegachtig mengsel van polymeren, toevoegingen en glasvezels. In het algemeen hebben de vezels een lengte van 3-50 mm, hoewel vezellengtes groter dan 75 mm ook voorkomen. Meestal worden hiermee vrij eenvoudige en kleinere producten geperst, zoals schakelaars en relaishuizen. Chassis van cd-spelers worden ook uit BMC gemaakt.
Een sheet-moulding compound (SMC) is dankzij de dunne folielagen aan de buitenzijden goed hanteerbaar, maar deze folielagen moeten bij het plaatsen van de SMC in de matrijs wel worden verwijderd. Onder andere brievenbussen, schotelantennes en autobumpers worden uit SMC gemaakt.

Een variant op persbewerkingen met een boven- en ondermatrijs is een proces waarbij het uitgangsmateriaal (SMC) in een ondermatrijs wordt gelegd en via een afgesloten flexibel membraan wordt aangedrukt. Dit gebeurt door vacuüm te trekken tussen de ondermatrijs en het membraan ('*vacuum-bag moulding*') of met behulp van een luchtdruk van 0,2-0,4 MPa boven het membraan ('*pressure-bag moulding*') (zie figuur 3.70). Het proces kan zowel



Figuur 3.70 Persen met behulp van een membraan door vacuüm (a) en luchtdruk (b)

bij kamertemperatuur als bij hogere temperaturen worden toegepast. Bij het gebruik van een SMC moet wel aandacht besteed worden aan de richting van de oriëntatie van de vezels. Verder mag de buitenlaag van de SMC niet aan de matrijs hechten. Vacuum-bag moulding wordt onder meer toegepast in de botenbouw en meubelindustrie, en met pressure-bag moulding worden bladen van windmolens vervaardigd.

Het proces wordt in een **autoclaaf** uitgevoerd wanneer relatief hoge drukken en temperaturen noodzakelijk zijn om werkstukken met een hogere dichtheid en weinig poriën te vervaardigen. Een autoclaaf is een drukkamer met regelbare temperatuur en druk, die ook voor het maken van hoogwaardige lijmverbindingen wordt gebruikt (zie paragraaf 9.6.3).

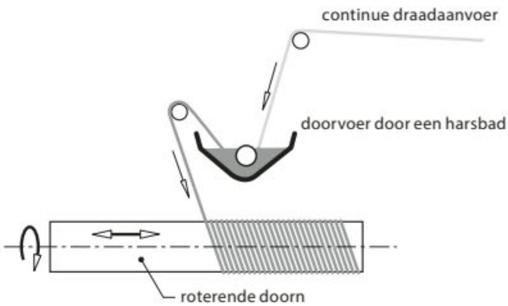
Wikkelen

Wikkelen wordt toegepast voor de fabricage van holle, vooral cilindrische, werkstukken. Een draaiende beweging van de doorn wordt hierbij gecombineerd met een heen en weer gaande beweging van de draadgeleider. De (glasvezel)draden worden door een harsbad getrokken en volgens een bepaald patroon – afhankelijk van de belasting van het werkstuk – op een doorn gewikkeld (zie figuur 3.71). In principe kan men ook band met een weefsel- of mattenstructuur opwikkelen. Ook kan vooraf geïmpregneerd materiaal gebruikt worden. Dit materiaal wordt zacht gemaakt door middel van hete lucht, verwarmde walsen, infraroodstraling of een laser.

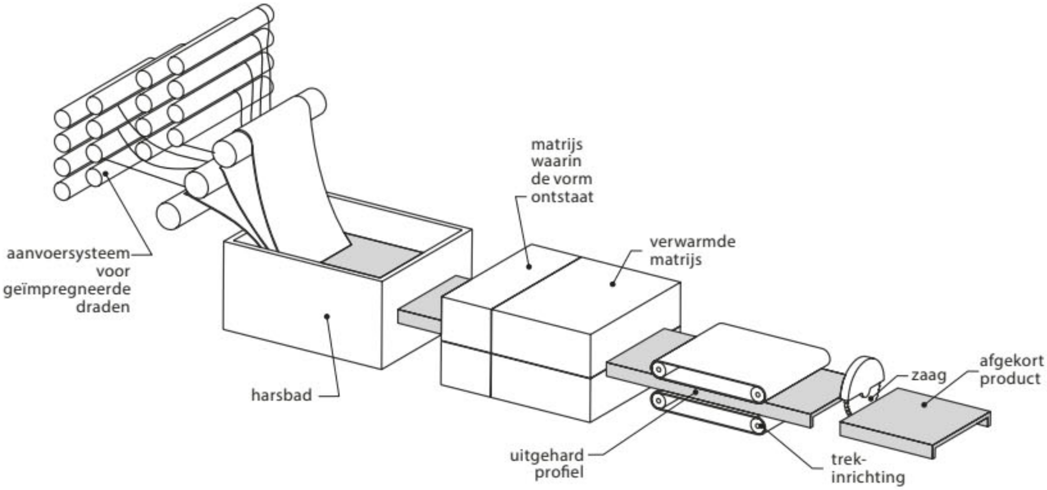
Door wikkelen kunnen producten met een gunstige sterkte-gewichtverhouding gemaakt worden, zoals pijpen en opslagtanks. Met complexe wikkelmachines kunnen ook asymmetrische werkstukken worden vervaardigd, zoals luchtinlaten van vliegtuigmotoren, scheepschroeven en bladen van windmolens.

Pultrusie

Pultrusie is een continu proces voor de vervaardiging van recht stafmateriaal met een uniforme dwarsdoorsnede (massief rond, profiel, vlakke strip en buis) uit vezelversterkte thermoharder. De vezelversterking, meestal in de vorm van een aantal voorgeïmpregneerde glasvezeldraden, wordt continu aangevoerd via een aantal spoelen. De bundel wordt door een bad getrokken met een viskeuze thermoharder, meestal een polyester. Daarna krijgt het product de gewenste vorm in een verwarmde stalen matrijs. Tijdens de verplaatsing door de matrijs, die een lengte van circa 1,5 meter heeft, hardt het materiaal uit, waarbij de doorvoersnelheid laag genoeg moet zijn om deze uitharding te laten plaatsvinden. Het eindproduct wordt op de gewenste lengte afgekort (zie figuur 3.72). Voorbeelden van producten die met pultrusie gemaakt worden, zijn golfclubs, skistokken, vishengels en onderdelen van ladders en loopbruggen.



Figuur 3.71 Principe van wikkelen



Figuur 3.72 Principe van het pultrusieproces

Pulforming

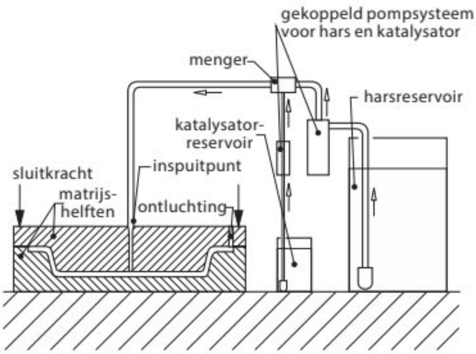
Pulforming is een continu proces voor de vervaardiging van relatief lange werkstukken uit vezelversterkte kunststof. Deze werkstukken zijn in lengterichting niet recht maar deels cirkelvormig en/of hebben geen uniforme dwarsdoorsnede. In feite kan pulforming gezien worden als een pultrusieproces met extra fabricagestappen voor het aanbrengen van een kromming in de lengterichting en het veranderen van de dwarsdoorsnede op één of meerdere plaatsen. De pultrusiematrijs bepaalt de primaire vorm van de dwarsdoorsnede. Als het werkmateriaal deze matrijs verlaat, wordt het met de glasvezeldraden tussen een roterende trommel en een cirkelvormige matrijshouder met vormholtes door getrokken. Hierbij wordt het werkstukmateriaal in de vormholtes gedrukt en neemt het tegelijkertijd een kromming in de lengterichting aan. Vervolgens wordt het materiaal afgekort en ontstaan discrete werkstukken. Onder andere latten van een kruisboog (zie figuur 3.73) en bladveren met een relatief laag gewicht voor auto's worden op deze manier gemaakt.



Figuur 3.73 Kruisboog met latten vervaardigd door pulforming (Horton Crossbows)

Impregneren onder druk

In figuur 3.74 zie je een schematisch voorbeeld van impregneren onder druk. Voorgevormd vezelversterkt materiaal wordt in een vormholte tussen een onder- en bovenmatrijs onder druk geïmpregneerd met een laagviskeuze thermoharder, vermengd met een katalysator. Dit proces wordt meestal aangeduid met de Engelstalige term **resin-transfer moulding** (RTM). Bij relatief eenvoudige producten bestaat de vezelversterking uit lapjes met een geweven structuur, die met de hand worden geplaatst of eventueel gestikt of geperst worden. Voor het maken van een



Figuur 3.74 Impregneren onder druk met een viskeuze thermoharder

weefselstructuur uit glasvezeldraad of koolstofvezeldraad voor hoogwaardige producten, zoals de draagarm van het landingsgestel van een helikopter, zijn complexe machines nodig.

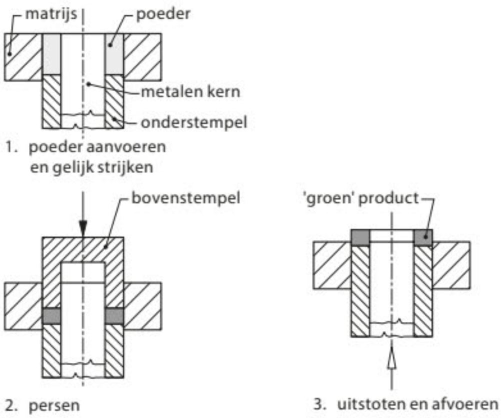
Het onder druk impregneren met viskeuze thermoharders wordt toegepast voor kleine productieseries en kenmerkt zich door relatief korte cyclustijden en relatief hoge gereedschapskosten. Het proces is geschikt voor grote producten, zoals bootrompen en windmolenbladen.

3.15 Poedermetallurgie

We beginnen deze paragraaf met een bespreking van wat poedermetallurgie is. We kijken naar de fabricagemethode, de vormgeving en de materiaaleigenschappen. Tot slot bespreken we twee recente ontwikkelingen op het gebied van de poedermetallurgie: warm isostatisch persen en het spuitgieten van metaalpoeders.

3.15.1 Inleiding

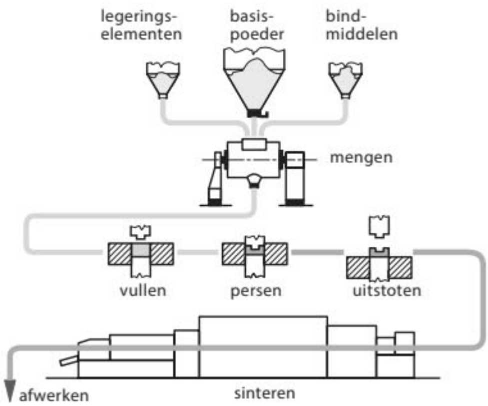
Poedermetallurgie (PM) is een vervaardigingstechniek waarbij een metallisch poeder in een vorm (matrijs) wordt samengeperst. Na het persen verkrijgt dit poeder volledige samenhang door gloeien op hoge temperatuur, oftewel **sinteren**. Ook het volledige proces wordt (ten onrechte) vaak sinteren genoemd. Producten die door spuitgieten, warmpersen, smeden of met de verloren-modelmethode gemaakt kunnen worden, kunnen vaak ook met PM worden vervaardigd. Het is een vervaardigingstechniek voor eenvoudige producten met nauwe toleranties, zodat nabewerking vaak niet nodig is. Dit maakt PM uitermate geschikt voor het maken van producten uit harde, slijtvaste metaallegeringen en keramische materialen, want deze materialen zijn heel moeilijk na te bewerken. Een bekende toepassing van PM in de productietechniek is het gebruik van hardmetaal (een legering met metaalcarbiden) als snijmateriaal voor verspanende bewerkingen (zie hoofdstuk 5). PM-producten worden verder toegepast in de automobielindustrie voor onderdelen van de transmissie, in de luchtvaartindustrie voor turbineschijven van straalmotoren, bij landbouwwerktuigen voor hefbomen en tandwielen, in onderdelen van printers, sloten, plunjers voor pompen, spangereedschappen voor bewerkingsmachines en messen voor het snijden van kunststof, papier en rubber. Juist door hun poreusheid kunnen PM-producten als (industriële) filters en lagers dienen. Als ze met olie zijn geïmpregneerd, zijn deze lagers vaak levenslang van smering voorzien.



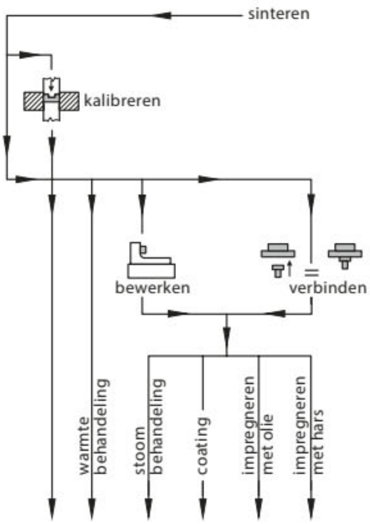
Figuur 3.75 Poederpersen

3.15.2 Fabricagemethode

In het algemeen gaat men bij poedermetallurgie uit van gelegeerde poeders met een gering gehalte aan verontreinigingen. Aan deze poeders worden meestal bindmiddelen en smeermiddelen toegevoegd om het persen te vergemakkelijken en de sterkte van het product na het persen, de zogeheten **groene sterkte**, te verhogen. Na het afwegen van de benodigde hoeveelheid wordt het poedermengsel in een matrijs gebracht, koud samengeperst met behulp van een bovenstempel en daarna uit de matrijs gestoten met het onderstempel (zie figuur



Figuur 3.76 Processtappen bij poedermetallurgie

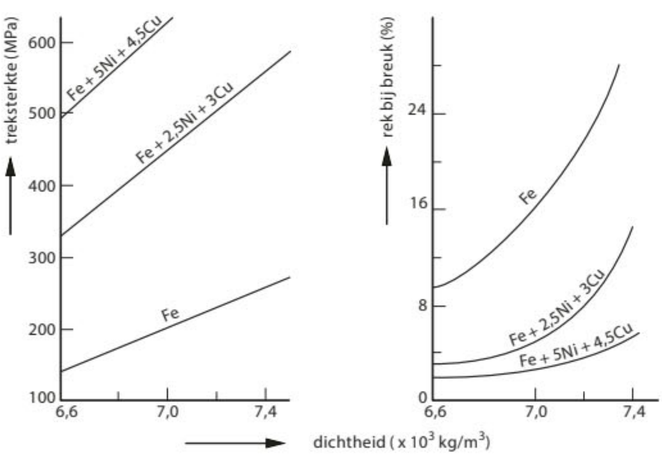


Figuur 3.77 Mogelijke processtappen na het sinteren

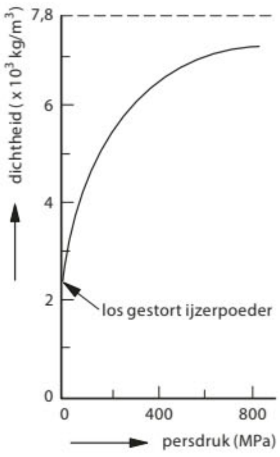
3.75). De voor het persen benodigde druk varieert van 300 tot 1000 MPa en is afhankelijk van de gewenste dichtheid, de geometrie van het product en de aard van het poeder. Het na het persen gevormde **groene product** wordt in een oven op hoge temperatuur gesinterd in een licht reducerende of neutrale atmosfeer, of onder vacuüm. Figuur 3.76 geeft de stappen voor de vervaardiging van een gesinterd product schematisch weer. Het is afhankelijk van de eisen die aan het product zijn gesteld of het product na het sinteren gereed is. Soms volgt nog een nabewerking, bijvoorbeeld kalibreren om de maatnauwkeurigheid te vergroten, of een warmtebehandeling ter verbetering van de mechanische eigenschappen (zie figuur 3.77). De dichtheid van het product na sinteren is bepalend voor de treksterkte en vooral voor de rek bij breuk (zie figuur 3.78).

De dichtheid die met persen alleen verkregen kan worden, is afhankelijk van de grootte van de persdruk. Voor een ijzerpoeder geven we in figuur 3.79 de dichtheid als functie van de persdruk. De theoretische dichtheid van 7800 kg/m³ wordt niet bereikt. Dit houdt in dat het geperste product altijd poreus is. Door sinteren groeit het metaalpoeder aaneen. Soms treedt ook rekristallisatie op. De grootte van het contactvlak tussen de diverse poederdeeltjes neemt daarbij toe en de poreusheid neemt af. Hoe dit in zijn werk gaat, is schematisch weergegeven in figuur 3.80. Bij de hoge temperaturen waarop wordt gegloeid, zal na verloop van tijd korrelgroei gaan optreden. De mate van de poreusheid, de verdeling daarvan en de grootte van de kristallen wordt in hoge mate bepaald door de sintertemperatuur en de verblijftijd in de oven.

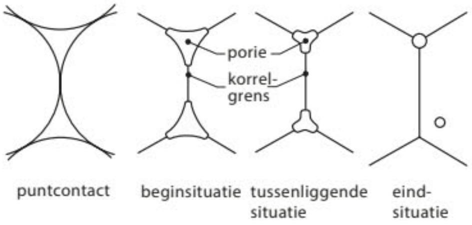
De dichtheid wordt niet alleen bepaald door de grootte van de persdruk, de sintertijd en de sintertemperatuur, maar ook door de vorm van de poederdeeltjes en de grootteverdeling. De vorm van de poederdeeltjes wordt bepaald door de manier waarop het poeder wordt gemaakt. Een veel toegepaste methode is **atomiseren**, waarbij met behulp van een gasstroom of een waterstraal vloeibaar metaal tot kleine ronde druppeltjes wordt verstoven.



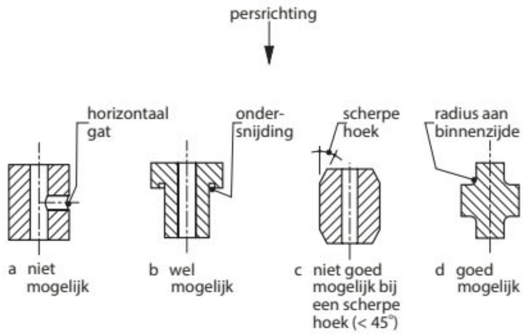
Figuur 3.78 Treksterkte en rek bij breuk voor een drietal materialen als functie van de dichtheid



Figuur 3.79 Dichtheid van ijzerpoeder als functie van de persdruk



Figuur 3.80 Afname van de poreusheid tijdens het sinteren, door het aaneengroeien van de poederdeeltjes en de vorming van korrelgrenzen



Figuur 3.82 Begrenzingen bij de vormgeving van PM-producten

Met het afnemen van de poreusheid zullen de afmetingen van het product kleiner worden; het product krimpt. De uiteindelijke afmetingen van het product worden bepaald door de grootte van de persdruk, de vorm, afmetingen en verdeling van de deeltjes, de sintertijd en -temperatuur en de geometrie van het product. De dichtheid in persrichting (axiale richting) is groter dan de dichtheid in radiale richting, waardoor de krimp in beide richtingen verschillend is. Bij complexe en asymmetrische producten kunnen plaatselijke variaties in dichtheid na het compacteren (persen) tot onverwachte maatafwijkingen leiden. Een sinterbedrijf kan de krimp en daarmee de afmetingen van het gesinterde product nauwkeurig voorspellen door een nauwkeurige procesbeheersing en op grond van ervaringen met gelijksoortige producten. Figuur 3.81 geeft richtlijnen voor de bereikbare toleranties.

Vormgeving

Gesinterde producten zijn in het algemeen eenvoudig van vorm. De geometrie van een PM-product wordt bepaald door beperkingen bij het vullen van de matrijs, het verdichten van het poeder door het naar elkaar toe bewegen van beide stempels, het terugtrekken van de bovenste stempel en het uitstoten van het gecompacteerde product. Het product uit figuur 3.82a is niet te maken, omdat het niet is uit te stoten, maar het product uit figuur 3.82b wel. De vormgeving van afschuiningen en afrondingen wordt begrensd door de stijfheid van het stempel. De vorm van figuur 3.82c is duidelijk minder gunstig dan die van figuur 3.82d. Voor meer richtlijnen om PM-producten te ontwerpen verwijzen we naar hoofdstuk 16.

Materiaaleigenschappen

Door een variatie in de samenstelling en korrelgrootte van het poeder, de persdruk, sintertijd en sintertemperatuur en een eventuele nabehandeling kunnen zeer diverse materiaaleigenschappen worden verkregen. Voor lagermaterialen wordt gebruikgemaakt van de poreusheid van gesinterde producten. De mate van poreusheid kan aangepast worden aan de aard van het smeermiddel, dat onder enige druk in het product wordt geïmpregneerd. Van de poreusheid kan ook gebruik worden gemaakt bij doseerventielen voor gassen en vloeistoffen.

Bij poedermetallurgie wordt veelvuldig gebruikgemaakt van ijzerlegeringen waaraan koper is toegevoegd. Hierdoor krijgt het materiaal een hogere dichtheid. Figuur 3.83 geeft een overzicht van een

Productiestappen	Dichtheid ($\times 10^3$ kg/m^3)	Maattoleranties voor ijzerlegeringen in persrichting	loodrecht op de persrichting	concentriciteit
PM-proces	< 6,6	IT 10	IT 11	IT 9
	6,6 - 7,2	IT 10	IT 12	IT 10
PM en kalibreren	< 6,6	IT 8	IT 10	IT 9
	6,6 - 7,2	IT 9	IT 10	IT 9
PM-proces, harden en ontlaten	< 6,6	IT 11	IT 11	IT 10
	6,6 - 7,2	IT 11	IT 12	IT 10

Figuur 3.81 Maattoleranties bij het sinteren van ijzerlegeringen

Materiaal	Treksterkte (MPa)	Rek (%)	Vermoeiingssterkte (MPa)	Toepassingsgebied en specifieke kenmerken
koolstofstaal				meest toegepaste PM-materialen
– gesinterd	160-380	1-15	60-150	
– warmtebehandeld	400-650	0,5	150-250	
staal met 1-10% Cu				onder andere toegepast voor lagers en dragende onderdelen
– gesinterd	200-510	0,5-5	70-200	
– warmtebehandeld	380-690	< 0,5	150-260	
staal met 2-4% Ni				voor mechanisch hoog belaste onderdelen
– gesinterd	250-650	0,5-8	100-240	
– warmtebehandeld	500-900	0,5-1	250-380	
roestvaststaal				meest toegepast bij hogere eisen aan corrosiebestendigheid, hogere hardheid
– 18Cr-10Ni	360-430	4-7	–	
– 18Cr-10Ni-2Mo	280-380	3-4	–	
– 13Cr (ferritisch)	290-380	0,5-1	–	
brons	55-300	1-20	–	lagermaterialen
messing	120-285	8-26	–	
aluminiumlegeringen				combinatie van goede corrosieweerstand en goede taaiheid
– gesinterd	100-200	3-10	35-45	
– geprecipiteerd	140-310	0,5-7	45-52	

Figuur 3.83 Mechanische eigenschappen van de meest gebruikte PM-materialen en hun toepassingsgebied

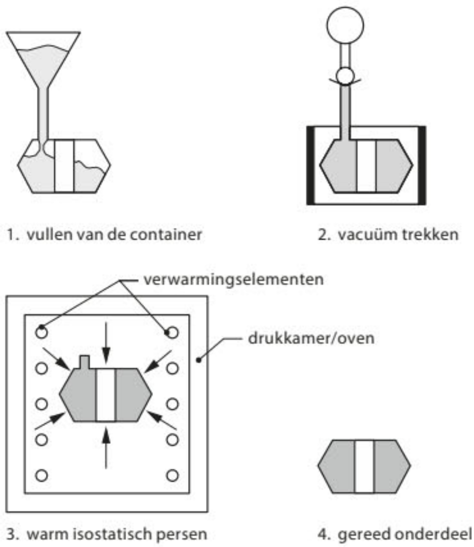
aantal PM-materialen, hun eigenschappen en hun toepassingsgebied.

3.15.3 Isostatisch persen

Warm isostatisch persen en metal injection moulding zijn recente ontwikkelingen op het gebied van de poedermetallurgie. Bij **warm isostatisch persen** wordt een zeer gelijkmatige verdichting van het product verkregen. De vorm, uitgevoerd als een flexibele, dunwandige metalen container, wordt na het vullen vacuüm gezogen en afgesloten (zie figuur 3.84). Het geheel wordt in een oven die met een inert gas of met een glasachtige vloeistof is gevuld, onder hoge druk en temperatuur (circa 1100 °C) gebracht. Met dit kostbare proces bereikt men dichtheden van vrijwel 100% en zeer goede mechanische eigenschappen. Een belangrijke toepassing is de vervaardiging van onderdelen van gasturbines met een grote warmtebelasting.

3.15.4 Spuitgieten van metaalpoeders

Bij het spuitgieten van metaalpoeders, meestal aangeduid als **powder injection moulding** (PIM) of **metal injection moulding** (MIM), worden zeer fijne metaalpoeders gemengd met een kunsthars. Dit mengsel wordt met een schroefextruder in een metalen matrijs gespoten. Het werkt dus hetzelfde als het spuitgieten van een kunststof. De kunststofhars wordt in een oven op lage temperatuur uitgebrand, waarna het sinteren plaatsvindt op hoge temperatuur. Het spuitgieten van keramische poeders (*'ceramic injection moulding'*) is ook mogelijk. Het proces combineert de materiaaleigenschappen van gesinterd metaal met de vormgevingsmogelijkheden van spuitgieten. Het is daardoor geschikt voor gecompliceerde fijnmechanische delen in grote aantallen. Het MIM-proces kenmerkt zich door



Figuur 3.84 Principe van het warm isostatisch persen



Figuur 3.85 Productvoorbeelden van metal injection moulding (AT&M)

nauwkeurige maattoleranties, goede mechanische eigenschappen en complexe productvormen met wanddiktes tot circa 5 mm. Als er meervoudige matrijzen worden gebruikt, ligt de productiesnelheid hoog. Nadelen van het spuitgieten van metaalpoeders zijn de hoge kosten en de beperkte verkrijgbaarheid van fijne metaalpoeders. Voorbeelden van producten die met dit proces worden vervaardigd zijn onderdelen voor horloges, geweren, scharnieren en chirurgische instrumenten (zie ook figuur 3.85).
Een andere nieuwe ontwikkeling is de vervaardiging van producten uit metaalpoeders door middel van een massief omvormproces, zoals walsen, extruderen en smeden (zie paragraaf 4.4), gevolgd door sinteren.

Samenvatting

Oervormen is het vervaardigen van producten of halffabricaten uit vormloos materiaal. Meestal is dit materiaal een vloeistof, in enkele gevallen een poeder.

Het gieten van metalen kan plaatsvinden in eenmalige vormen uit zand, die na het gieten van het product niet opnieuw bruikbaar zijn. Het blijvende gereedschap is dan het model. Een variant hierop is het verloren-modelproces, waarbij ook het model eenmalig bruikbaar is. Het blijvende gereedschap is dan een matrijs waarin per werkstuk een nieuw model wordt gemaakt. Een andere mogelijkheid is het gieten in blijvende, metalen vormen. Afhankelijk van de seriegrootte kan het gieten in meer of mindere mate worden gemechaniseerd. Alle gietprocessen hebben specifieke voor- en nadelen. De juiste keuze van het gietproces is van groot belang voor de kwaliteit, de kostprijs en de levertijd.

Voor het verkrijgen van gietstukken met een goede kwaliteit moet het ontwerp van het gietstuk zijn afgestemd op de mogelijkheden van het gekozen gietproces. Hiervoor hebben we in dit hoofdstuk een aantal ontwerpregels geformuleerd. Vroegtijdig overleg tussen een ontwerper en een gieterijdeskundige is onmisbaar voor het succesvol ontwerpen van een gietstuk.

Het (spuit)gieten van kunststoffen is vooral voor de grootseriefabricage van belang. Dit gebeurt vrijwel altijd in metalen vormen, waarmee vele producten kunnen worden vervaardigd. De processen hiervoor hebben meestal belangrijke overeenkomsten met die voor metalen. Ook andere vormgevingsprocessen voor kunststoffen, zoals extruderen, kalanderen en koud- en warmpersen, komen in dit hoofdstuk aan de orde.

Voor de vormgeving van vezelversterkte kunststoffen zijn een aantal specifieke processen ontwikkeld, zoals wikkelen en pultrusie.

Poedermetallurgie, het persen en vervolgens sinteren van mengsels van poeders van metalen en/of van keramische materialen, is vooral van belang voor het maken van kleine delen met bijzondere materiaaleigenschappen (hard, slijtagebestendig, temperatuurbestendig, gewenste poreusheid). Door middel van het spuitgieten van metaalpoeders is het mogelijk producten met een complexe geometrie en een hoge nauwkeurigheid te maken.

Literatuur

3.1 Kalpakjian S., Schmid S.R., *Manufacturing Engineering and Technology*, 7th SI edition, Pearson, 2014, ISBN 978-981-06-9406-7. Hoofdstuk 10 'Fundamentals of metal casting'; hoofdstuk 11 'Metal-casting processes and equipment'; hoofdstuk 12 'Metal casting: design, materials and economics'; hoofdstuk 17 'Powder-metal processes and equipment'; hoofdstuk 19 'Plastics and composite materials: forming and shaping'.

3.2 Groover M.P., *Principles of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems*, 5th SI edition, Wiley, 2013, ISBN 978-1-118-47420-4. Hoofdstuk 7 'Fundamentals of casting'; hoofdstuk 8 'Metal casting processes'; hoofdstuk 10 'Shaping processes for plastics'; hoofdstuk 11 'Processing of polymer matrix composites and rubber'; hoofdstuk 12 'Powder metallurgy'.

3.3 Cambell J., *Complete Casting Handbook*, 2nd edition, Elsevier, Imprint: Butterworth-Heinemann, 2015, ISBN 978-0-444-63509-9.

3.4 Beeley P., *Foundry Technology*, 2nd edition, Elsevier, Imprint: Butterworth-Heinemann, 2001, ISBN 978-0-7506-4567-6.

3.5 Vegt A.K. van der, Govaert L.E., *Polymeren: van keten tot kunststof*, VSSD Delft, 2005, ISBN 978-9-071-30148-3.

3.6 Young R.J., Lovell P.A., *Introduction to Polymers*, 3rd edition, CRC Press, 2011, ISBN 978-0-84-933929-5.

3.7 Harper C.A., *Handbook of Plastic Processes*, Wiley, 2006, ISBN 978-0-471-66255-6.

3.8 Upadhyaya A., Upadhyaya G.S., *Powder Metallurgy: Science, Technology and Materials*, CRC Press, 2011, ISBN 978-1-43-985746-5.

Oefenvragen

3.1 De gemiddelde kristalgrootte van een gietstuk, en daarmee ook de sterkte, is afhankelijk van een aantal factoren. Noem de belangrijkste.

3.2 Welke mogelijkheden heeft de ontwerper om de gevolgen van slink te beperken?

3.3 Bij de vormgeving van gietstukken speelt lossing een belangrijke rol. Bij welke van de meest gangbare gietprocessen wordt de vorm van het gietstuk in de praktijk het minst beperkt door de eisen die in verband met de lossing gesteld moeten worden? Licht je antwoord toe.

3.4
- a Welke factoren bepalen de maatnauwkeurigheid bij zandvormen?
- b Welke factoren bepalen de maatnauwkeurigheid bij de verloren-wasmodelmethode?

Licht je antwoord kort toe.

3.5 Met spuitgieten kunnen metalen werkstukken en werkstukken uit kunststof worden vervaardigd. Maak een vergelijking tussen het spuitgieten van metalen en thermoplasten. Noem ten minste drie verschillen en vijf overeenkomsten. Besteed hierbij aandacht aan het proces en aan de spuitgietmachine.

3.6 Welke twee vorm-/giettechnieken komen in aanmerking voor aluminium gietstukken met een wanddikte van meer dan 10 mm? Motiveer je antwoord.

3.7 Welke van de behandelde vormgevingstechnieken voor kunststoffen worden zowel voor de verwerking van thermoplasten als voor de verwerking van thermoharders toegepast?

3.8 Om de vormgevingsmogelijkheden bij spuitgieten te kwantificeren wordt het begrip ‘vloeiwegverhouding’ gebruikt.
- a Wat is de ‘vloeiwegverhouding’?
- b Welke betekenis heeft dit begrip voor een ontwerper van spuitgietproducten?
- c Noem een aantal factoren die invloed hebben op de waarde van de vloeiwegverhouding.
- d Zijn er nog andere mogelijkheden om de ontwerper een beeld van het vloeigedrag te geven? Zo ja, welke?

3.9 Maak een vergelijking tussen het extrusieproces, het pultrusieproces en het pulformingproces.

3.10 Bij welke soorten producten en bij welke materialen zou je kiezen voor poedermetallurgie?

inclusief website!

Op www.industrieleproductie.nl vind je de antwoorden op deze vragen, maar ook extra studie- en oefenmateriaal, zoals video’s en meer opgaven.

4 Omvormen

In dit hoofdstuk behandelen we de principes van het omvormen van metalen en in mindere mate die van het omvormen van kunststoffen. We laten zien wat er bij omvormen met het materiaal gebeurt en welke invloed de mechanische eigenschappen van het werkstukmateriaal op het omvormproces en de omvormbaarheid hebben.
In dit hoofdstuk geven we een algemeen overzicht van de belangrijkste omvormprocessen, en van de hiervoor benodigde gereedschappen en gereedschapswerktuigen.

4.1 Inleiding

In hoofdstuk 3 hebben we de vormgeving van producten via de vloeibare fase behandeld. Met deze gietprocessen kunnen directe eindproducten worden vervaardigd, maar ook blokken (*ingots*), die als uitgangsmateriaal dienen voor het maken van halffabricaten, zoals plaat, staf, draad, buis en profiel. Deze vormen zijn met gieten moeilijk te realiseren en worden door een vormverandering in de vaste toestand verkregen. Vaak zijn ook de gewenste mechanische eigenschappen niet realiseerbaar met gieten. Door omvormen kan de minder gunstige gietstructuur worden omgezet in een meer fijnkristallijne structuur zonder gasholten.

Het mechanisch gedrag van het werkstukmateriaal tijdens de bewerking en de productgeometrie bepalen grotendeels in hoeverre de omvormtechnologie in staat is om een bepaald product te vervaardigen.

4.2 Omvormen van metalen

Het omvormen van metalen zoals dat in veel omvormprocessen plaatsvindt, komt in feite overeen met het plastische deformatieproces van materialen (zie hoofdstuk 2). Bij omvormen gaat het om een doelbewuste plastische deformatie om de beoogde vorm van het werkstuk te verkrijgen. In deze paragraaf definiëren we de begrippen ‘omvormen’ en ‘omvormbaarheid’ en lichten we de invloed van de omvormtemperatuur toe.

4.2.1 Omvormen en omvormbaarheid

Het begrip **omvormen** kan worden gedefinieerd als het op beheerste wijze plastisch veranderen van de vorm van een vast lichaam, zodanig dat de materiaalsamenhang en dus ook de massa van het lichaam behouden blijft.

Onder het begrip **omvormbaarheid** van een materiaal verstaan we de mate waarin een materiaal vervormingen kan ondergaan zonder dat de samenhang van het materiaal wordt verstoord, in combinatie met de benodigde inspanning en voorzorgsmaatregelen om de gewenste plastische vormverandering te bereiken.

Bij de praktische uitvoering van omvormprocessen blijkt meestal een aanmerkelijk hogere kracht nodig te zijn dan je op basis van de verstevigingskromme (zie figuur 2.11) zou verwachten. De benodigde kracht wordt niet alleen bepaald door het materiaal, maar ook door de vorm van het product en vooral door de wrijving van het werkstukmateriaal langs de oppervlakken van het gereedschap. Men spreekt in dit verband van de **omvormweerstand** k_w. De omvormweerstand is dus altijd groter dan de effectieve spanning van het materiaal. De verhouding tussen de omvormweerstand en de effectieve spanning wordt weergegeven door het **omvormrendement**:

$$\eta_k = \frac{\bar{\sigma}}{k_w}$$

Het is afhankelijk van de toegepaste belasting op het werkstukmateriaal in hoeverre het materiaal in staat is om een vormverandering te ondergaan.

De grens van de benutbare vormverandering wordt bereikt wanneer plastische instabiliteit optreedt (zie paragraaf 2.3.4). Voor omvormprocessen die uitsluitend onder drukbelasting verlopen is het bereiken van deze grens theoretisch niet mogelijk. De meeste processen verlopen echter onder gecombineerde trek- en drukbelastingen, waardoor in het materiaal scheuren kunnen ontstaan. Omvormprocessen onder trekbelasting bereiken snel de grens van plastische instabiliteit, maar als tijdens het proces versteviging optreedt (zie paragraaf 2.3.3), wordt in het product een gelijkmatiger rekverdeling gerealiseerd, waardoor plastische instabiliteit wordt uitgesteld. Dit is het geval wanneer het proces koud wordt uitgevoerd (zie paragraaf 4.2.2).

4.2.2 Omvormtemperatuur

De temperatuur waarbij het omvormproces plaatsvindt, heeft een grote invloed op het materiaalgedrag. Tijdens het omvormen treedt versteviging op wanneer het uitgangsmateriaal niet of nauwelijks verwarmd is. Men spreekt dan van **koudomvormen**.

Bij een verhoging van de temperatuur zal in eerste instantie de kristalstructuur van het materiaal (nog) niet veranderen, maar zullen de dislocaties zich gemakkelijker verplaatsen vanwege het hogere energieniveau. Hierdoor neemt de vormveranderingsweerstand af en de breekrek toe. Dit **halfwarmomvormen** vindt plaats in het temperatuurgebied van $0{,}3 \times T_{sm} < T < 0{,}5 \times T_{sm}$, waarbij T_{sm} de smelttemperatuur in Kelvin voorstelt.

Wanneer de temperatuur nog verder wordt verhoogd, zal bij een temperatuur $T \approx 0{,}6 \times T_{sm}$ rekristallisatie beginnen op te treden. Boven een bepaalde drempelwaarde in de deformatie zullen de gedeformeerde kristallen worden omgezet in nieuwe kristallen. De eigenschappen van deze kristallen zijn ongeveer gelijk aan die van het niet-vervormde materiaal. Het effect van de versteviging zal dus door rekristallisatie verdwijnen. Bij omvormen boven de rekristallisatietemperatuur ($0{,}7 \times T_{sm} < T < 0{,}8 \times T_{sm}$) spreekt men van **warmomvormen**. Hierbij treedt dus geen versteviging op, waardoor de omvormkrachten lager zijn en onder een drukbelasting grote vervormingen kunnen worden gerealiseerd.

4.3 Indeling van omvormprocessen

Voor het classificeren van omvormprocessen kunnen verschillende kenmerken worden gebruikt, zoals de soort belasting, de mate en de manier van deformatie, de procestemperatuur, de invloed van de versteviging, de continuïteit van het proces, de aard en/of de vorm van het uitgangsmateriaal enzovoort. Al dit soort classificaties moeten met de nodige flexibiliteit gehanteerd worden, zoals ook al bleek uit de indeling tussen koud-, halfwarm- en warmomvormen die we bespraken in paragraaf 4.2.2. Zo wordt het smeden van staal traditioneel als een warmomvormproces gezien, maar zijn het munten en het kopstuiken van bijvoorbeeld spijkers in feite smeedprocessen die bij kamertemperatuur plaatsvinden.

Bij de verdere behandeling van de stof zullen we een indeling aanhouden op basis van de aard of vorm van het uitgangsmateriaal, en het type eindproduct. We maken hierbij allereerst onderscheid tussen massief omvormen en omvormen van plaat.

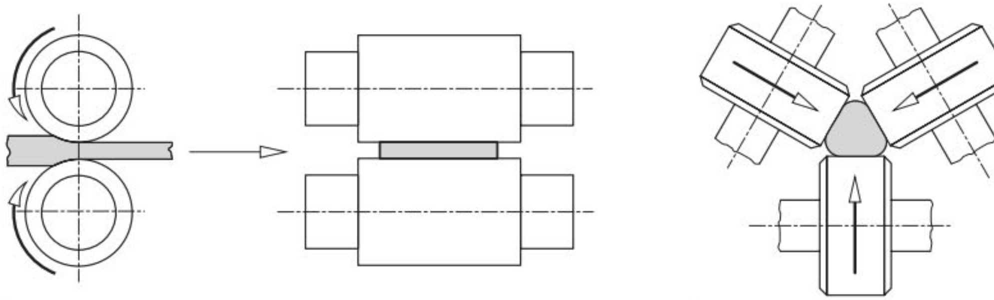
Massief omvormen

Bij **massief omvormen** gaat men uit van staf-, draad-, buis- of profielmateriaal. Werkstukken die op deze manier worden vervaardigd, kenmerken zich door een relatief kleine oppervlakte/volumeverhouding. De spanningstoestand is driedimensionaal en drukspanningen spelen meestal een belangrijke rol. Het omvormproces veroorzaakt zowel in vorm als dikte een grote verandering. De elastische terugvering is meestal te verwaarlozen.

Op basis van de vorm van de eindproducten kan een verdere onderverdeling gemaakt worden in:
- **continu verlopende processen** zoals walsen, extruderen en trekken, voor de vervaardiging van halffabricaten,
- **cyclisch verlopende processen** zoals smeden, voor de vervaardiging van discrete (ruwe) eindproducten.

Omvormen van plaat

Bij het **omvormen van plaat** gaat men uit van gewalste plaat. Werkstukken die op deze manier worden vervaardigd, kenmerken zich door een zeer groot oppervlak in vergelijking tot het volume. De spanningen loodrecht op de plaat zijn in het



a b

Figuur 4.1 Vlak- (a) en profielwalsen (b)

algemeen verwaarloosbaar klein ten opzichte van die in het vlak van de plaat. De uitgeoefende krachten zijn trekkrachten of een combinatie van trek- en drukkrachten. Het omvormproces veroorzaakt een grote vormverandering, maar een kleine (vaak ongewenste) verandering in dikte, waarbij een aanmerkelijke elastische terugvering kan optreden. Bij de omvormprocessen van plaat, waaronder buigen, strekbuigen, forceren, vloeidraaien en dieptrekken, ontstaan hoofdzakelijk discrete producten.

4.4 Massief omvormen

Bij massief omvormen wordt het proces zowel koud, halfwarm als warm uitgevoerd. Koud en halfwarm uitgevoerde processen zijn gangbaar wanneer de werkstukvorm niet te sterk verandert en wanneer er hogere eisen gesteld worden aan de mechanische eigenschappen en oppervlaktekwaliteit. Warm uitgevoerde processen worden vooral toegepast bij relatief grote werkstukken. In deze paragraaf behandelen we het walsen, extruderen, trekken en smeden.

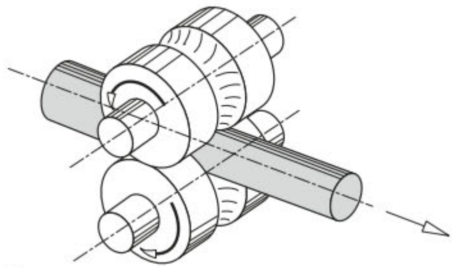
4.4.1 Walsen

Walsen is een proces waarbij de doorsnede van een relatief lang werkstuk door middel van drukkrachten met behulp van één of meer paren draaiende walsrollen wordt veranderd. Zowel de afmetingen als de vorm kunnen veranderen. Meestal gaat het om het aanbrengen van een diktevermindering (zie figuur 4.1a).

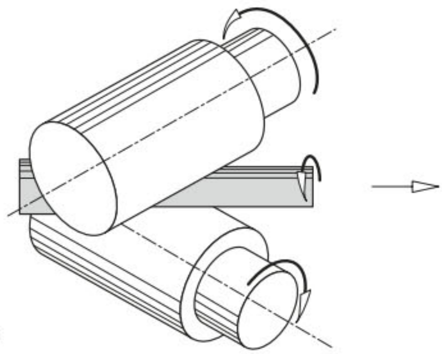
Men maakt onderscheid tussen **langswalsen** en **schuinwalsen** (zie figuur 4.2). Bij langswalsen beweegt het materiaal zich loodrecht op de as van de walsrol. Bij schuinwalsen veroorzaken de walsrollen een rotatiebeweging om de lengteas van het materiaal en vindt er een voedingsbeweging in de richting van de lengteas plaats.

Deze twee groepen kunnen we verder onderverdelen in **vlakwalsen** en **profielwalsen** (zie figuur 4.1). Door profielwalsen kunnen zowel massieve als holle profielen worden vervaardigd.

Het walsproces kan warm, halfwarm of koud verlopen. De grove, brosse gietstructuur van het uitgangsmateriaal (de ingot) wordt bij warmwalsen door middel van rekristallisatie (zie paragraaf 4.2.2) omgezet in een fijnkristallijne, ductiele kneedstruc-



a



b

Figuur 4.2 Langswalsen (a) en schuinwalsen (b)

tuur. Warmgewalste producten hebben vanwege krimp en oxidatie een beperkte maatnauwkeurigheid en een vrij ruw oppervlak (zie figuur 14.17). Platen en profielen met hoge eisen ten aanzien van de maatnauwkeurigheid en oppervlaktekwaliteit worden na warmwalsen koudgewalst. Door koudwalsen wordt via de ingebrachte koudversteviging ook de sterkte van het materiaal verbeterd. Bij zacht staal zorgt koudwalsen bovendien voor een continue overgang tussen het elastisch en plastisch gebied. Uitgegloeid zacht staal heeft deze overgang niet. Blanke dunne plaat tot circa 3 mm wordt vervaardigd door koudwalsen na het warmwalsproces. Een bijzondere kwaliteit van deze plaat is de dieptrekkwaliteit (zie paragraaf 4.5.4).
Bij warmwalsen ligt de walstemperatuur rond de 450 °C voor aluminiumlegeringen, maximaal op circa 1200 °C voor ongelegeerde staalsoorten en maximaal op circa 1650 °C voor hittebestendige legeringen.

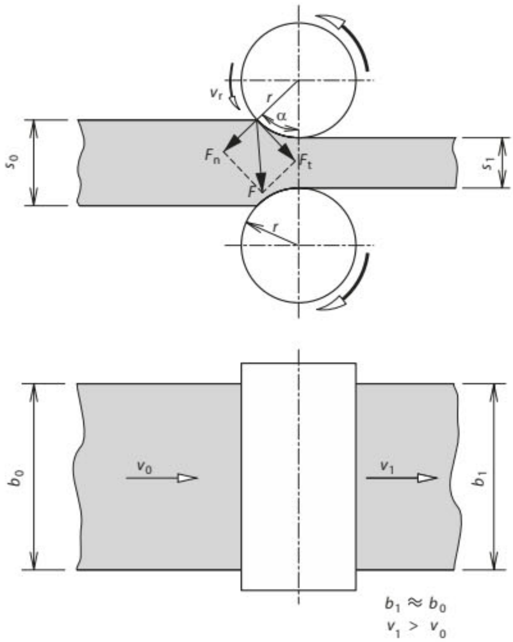
Het basisproces is **vlakwalsen**, dat resulteert in een plaat of folie. De walsbreedte bedraagt maximaal 5 m en de dikte van het gewalste product varieert tussen circa 150 mm en 0,0025 mm. Zoals je kunt zien in figuur 4.3, wordt de plaat met dikte s_0 in de walsspleet met behulp van een paar draaiende walsrollen gereduceerd tot een dikte s_1. Plaat wordt, in tegenstelling tot strip, gekenmerkt door een zeer grote verhouding tussen breedte en dikte. De wrijving zorgt er in dat geval voor dat ondanks een aanzienlijke diktereductie, de plaatbreedte b bij goede benadering constant blijft. Omdat, zoals bij iedere plastische vervorming, ook het volume V constant blijft, leidt dit tot de volgende betrekking:

$$V_0 = s_0 \times b \times l_0 = s_1 \times b \times l_1 = V_1$$
$$\Downarrow$$
$$s_0 \times l_0 = s_1 \times l_1$$

De materiaal- of volumestroom vóór en na het walsen is:

$$s_0 \times b \times v_0 = s_1 \times b \times v_1$$
$$\Downarrow$$
$$s_0 \times v_0 = s_1 \times v_1$$

Omdat bij een constante omtreksnelheid v_r van de walsrol de snelheid van het werkstukmateriaal geleidelijk toeneemt van de beginsnelheid v_0 tot de eindsnelheid v_1, ontstaat er – behalve in één punt – een snelheidsverschil tussen de walsrol en het werkstukmateriaal. Dit heeft slip en wrijving tot gevolg.



Figuur 4.3 Het walsen van plaat

De grootte van de wrijvingskracht verloopt over het contactoppervlak en is aan de intreezijde bovendien anders gericht dan aan de uittreezijde. Voor de uitvoering van het walsproces is het essentieel dat de resulterende wrijvingskracht het werkstukmateriaal als het ware door de walsspleet kan trekken. Dit vormt het uitgangspunt van de formule voor de maximaal haalbare **diktereductie** $(s_0 - s_1)_{max}$:

$$(s_0 - s_1)_{max} \approx \mu^2 \times r$$

Hierin is μ de wrijvingscoëfficiënt tussen de plaat en de walsrollen, en r de straal van de walsrollen.

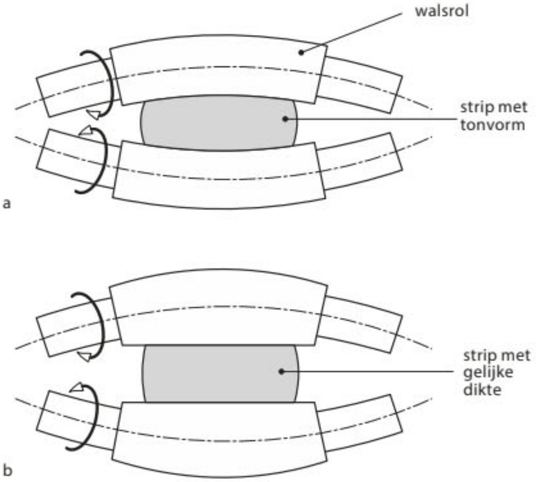
Bij het invoeren wordt het materiaal alleen in de walsspleet getrokken als aan de **meeneemvoorwaarde** voldaan is (zie figuur 4.3):

$$F_t \times \cos\alpha \geq F_n \times \sin\alpha$$

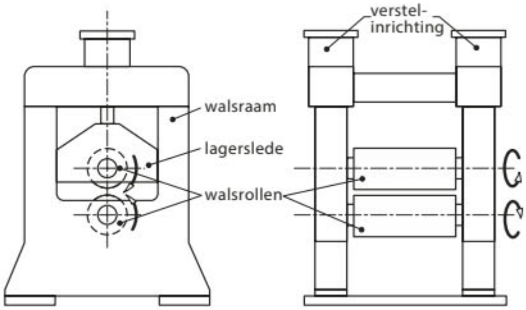
Daaruit volgt met $F_t = F_n \times \mu$ dat

$$F_n \times \mu \times \cos\alpha \geq F_n \times \sin\alpha$$
$$\Downarrow$$
$$\tan\alpha \leq \mu$$

De grootte van de **meeneemhoek** α wordt bepaald door de walsroldiameter en door de diktereductie.



Figuur 4.4 Doorbuigen van walsrollen (overdreven weergegeven)



Figuur 4.5 Het walswerktuig

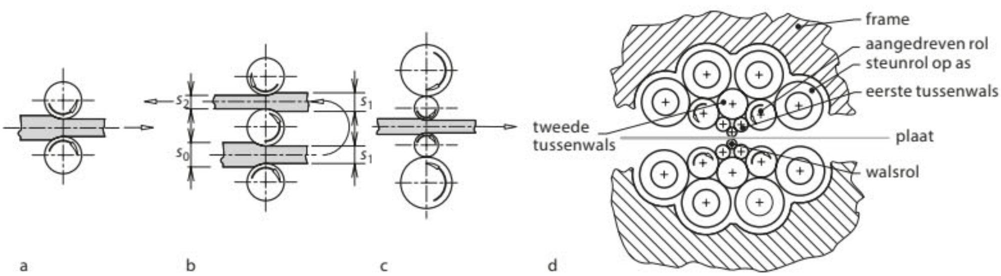
Bij een verkleining van de walsroldiameter zal de walskracht afnemen. Bovendien zal de buigstijfheid van de walsrol hierdoor aanzienlijk verminderd worden. De elastische doorbuiging van de walsrollen leidt tot een productdoorsnede met een niet-constante dikte (zie figuur 4.4a). Dit kan voor een groot deel worden vermeden door tonvormig geslepen walsen (zie figuur 4.4b) of steunrollen (zie figuur 4.6c,d) toe te passen.

Zowel uit de meeneemvoorwaarde als uit de formule voor de maximaal haalbare diktereductie blijkt dat een grote wrijvingscoëfficiënt gunstig is. Daar staat echter tegenover dat als de wrijving toeneemt, de walskrachten en het benodigd walsvermogen ook toenemen. Bovendien zullen de walsrollen dan sterker slijten en zal de oppervlaktekwaliteit van de gewalste plaat afnemen. In de praktijk zal men dus een compromis moeten vinden.

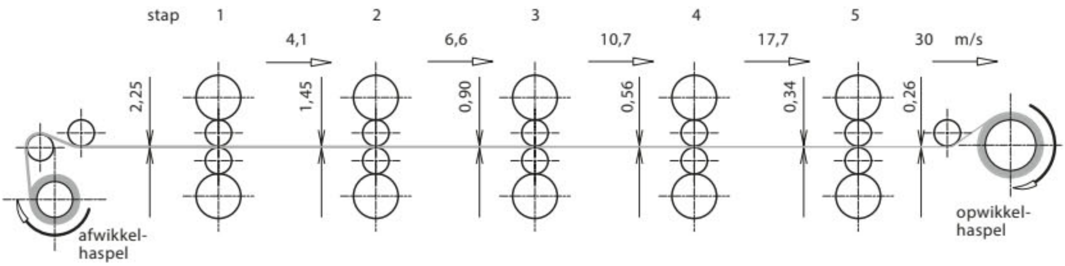
Een **walswerktuig** bestaat in feite uit een walsraam voorzien van walsrollen (zie figuur 4.5). Walsramen uit één stuk zijn doorgaans stijver dan die met een gemonteerde dwarsbalk aan de bovenzijde. Onder belasting zal het walsraam in meerdere of mindere mate uitveren. Om te voorkomen dat de walsspleet hierdoor te groot wordt, zullen de walsrollen dichter naar elkaar gesteld moeten worden.
Bij het vlakwalsen van producten met een geringe breedte/dikteverhouding neemt de stripbreedte toe, in tegenstelling tot bij het walsen van plaat. Deze verbreding kan worden voorkomen door gebruik te maken van verticale rollen, zogenaamde kantrollen.

De werkingsprincipes van de belangrijkste walswerktuigen zijn in figuur 4.6 te zien.

Duo- en **trio-walswerktuigen** (zie figuur 4.6a,b) worden vooral voor warmwalsen in de beginfase van het proces gebruikt. In het trio-walswerktuig wordt de richting van de materiaalbeweging na elke doorgang omgekeerd. De plaat wordt per cyclus doorgeleid naar de bovenste walsspleet, gewalst en weer neergelaten naar het onderste rollenpaar.



Figuur 4.6 Werkingsprincipes van walswerktuigen: duo- (a), trio- (b), kwarto- (c) en tros- (d) walswerktuig



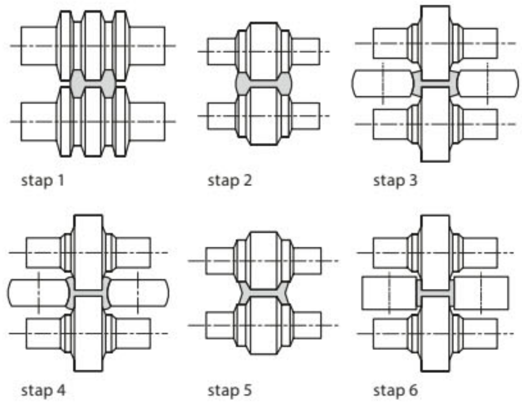
Figuur 4.7 Het verloop van de plaatdikte en de doorvoersnelheid bij een continue walsstraat

Kwarto-walswerktuigen of vierling-walswerktuigen (zie figuur 4.6c) en **tros-walswerktuigen** (zie figuur 4.6d) zijn ontwikkeld op basis van het principe dat walsen met kleinere diameters minder walskracht en vermogen vereisen. Bovendien kunnen dunnere walsen gemakkelijker en goedkoper vervangen worden. Het probleem van het doorbuigen van dunnere walsrollen is met de steunrollen opgelost. Het tros-walstuig is bijzonder geschikt voor het koudwalsen van dunne strip en van materialen met grote sterkte.

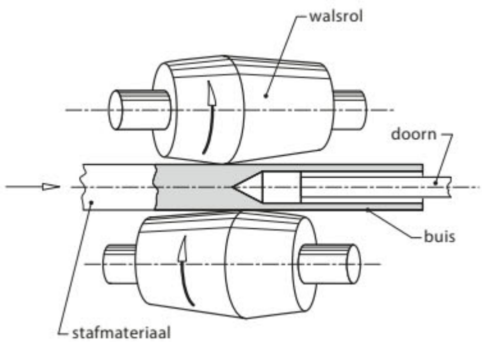
Dikwijls wordt een aantal walswerktuigen achter elkaar gegroepeerd, waardoor er een **continue walsstraat** ontstaat. Dit vraagt wel om een lange fabriekshal! Aangezien de doorvoersnelheid bij iedere deformatiestap toeneemt (zie figuur 4.7), is de besturing van een continue walsstraat niet eenvoudig. Behalve plaat kan ook profiel, zoals staf met een ronde of rechthoekige doorsnede, buis, spoorrails en staalprofiel, gewalst worden door gebruik te maken van een aantal speciaal ontworpen, geprofileerde walsrollen. In figuur 4.8 zie je als voorbeeld de zes stadia, waarin een H-profiel door continu walsen tot stand komt.

Schuinwalsen is geschikt voor het reduceren van cilindrische profielen. Een bijzondere uitvoering van schuinwalsen is het **Mannesmann-proces** (zie figuur 4.9). Hiermee kunnen naadloze dikwandige buizen worden gewalst. Door het schuinwalsen van de ronde massieve staf in het warmomvormgebied ontstaat er een holte op de hartlijn van het stafmateriaal. Een vaste doorn zorgt ervoor dat deze holte uitzet en brengt de binnendiameter op de juiste maat. Hierbij is het van wezenlijk belang dat het uitgangsmateriaal van goede kwaliteit is.

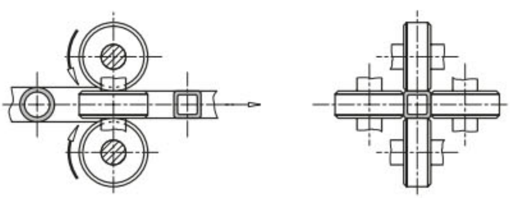
Figuur 4.10 toont hoe, uitgaande van ronde buis, vierkante buis vervaardigd kan worden door vlakke walsen in een geschikte opstelling.



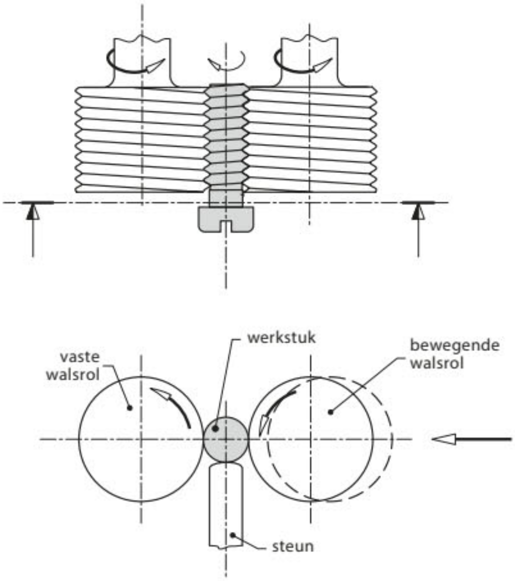
Figuur 4.8 Het walsen van een H-profiel



Figuur 4.9 Het walsen van naadloze buis



Figuur 4.10 Profielwalsen van buis

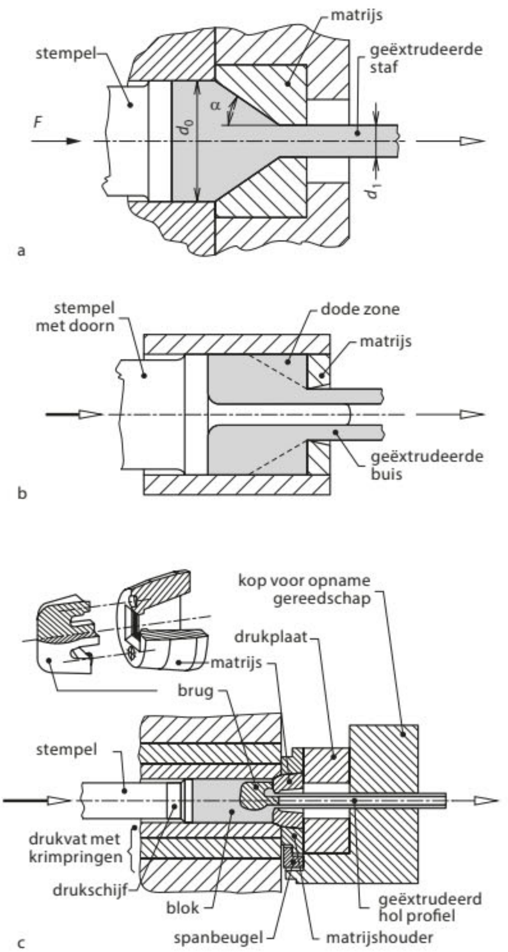


Figuur 4.11 Schroefdraadrollen

Ook het rollen van schroefdraad kan als een vorm van profielwalsen gezien worden (zie figuur 4.11). Het cilindrische werkstuk ligt hierbij op een steun tussen de walsen waarop het gewenste schroefdraadprofiel is aangebracht. De diameter van de schroefdraad van het werkstuk wordt bepaald door de ingestelde walsspleet en de uitgangsdiameter.

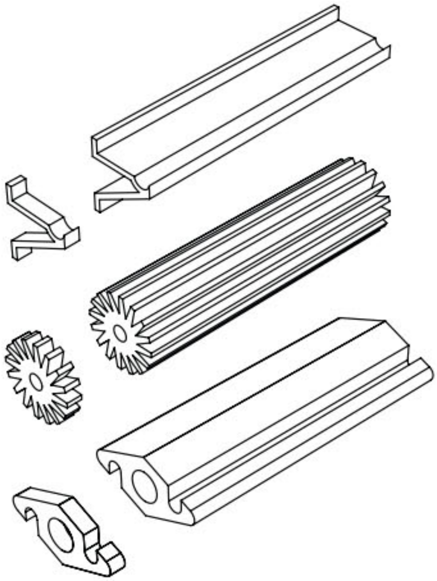
4.4.2 Extruderen

Bij **extruderen** wordt het uitgangsmateriaal met behulp van een stempel door een matrijsopening geperst (zie figuur 4.12a). Het product, een staf, buis of profiel, kan nagenoeg alle doorsnedevormen hebben. Afhankelijk van de eindvorm onderscheidt men staf- en buisextrusie. De extrusielengte wordt bepaald door het volume van het uitgangsblok. Door het extrusieproduct op de gewenste maat af te korten ontstaan discrete onderdelen (zie figuur 4.13). Materialen die in de praktijk dikwijls geëxtrudeerd worden, zijn aluminium, koper, lood, magnesium, gelegeerde staalsoorten en C-staalsoorten. Omdat de lengte van het uitgangsblok in verband met de slag en de perskracht van de machine beperkt is (zie paragraaf 4.6), is extrusie een semicontinu proces. Voor de 'seat-rail' van een passagiersvliegtuig (zie figuur 4.14a) wordt geëxtrudeerd profiel (zie figuur 4.14b) als uitgangsmateriaal gebruikt.



Figuur 4.12 Meelopende extrusie van staf (a), van buis (b) en van holle profielen met behulp van brugmatrijs (c)

Het basisproces is **meelopend extruderen**. Bij dit proces verplaatst het materiaal zich in dezelfde richting als het stempel (zie figuur 4.12a). De matrijs bepaalt de vorm en afmetingen van de doorsnede van het product. Bij buisextrusie is het gereedschap van een doorn voorzien (zie figuur 4.12b) of wordt een **brugmatrijs** gebruikt (zie figuur 4.12c). Hierdoor ontstaan holle profielen.
Bij meelopend extruderen wordt de geometrie van de extrusiematrijs mede bepaald door de matrijshoek α (zie figuur 4.12a). Bij hoge waarden van α, in de praktijk vaak 90°, ontstaat een zogeheten **dode zone** (zie figuur 4.12b). Het achtergebleven materiaal, de **blokrest**, dient later van het product te worden gescheiden.



Figuur 4.13 Extrusieproducten

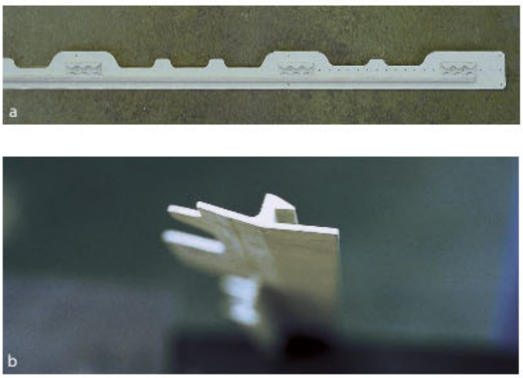
De voor extrusie benodigde kracht is afhankelijk van de sterkte van het werkstukmateriaal, de doorsnedeverandering, de wrijving tussen het werkstuk en de matrijs en van procesparameters zoals temperatuur en extrusiesnelheid. De kracht voor koudextrusie kan worden benaderd met de empirische betrekking:

$$F_{\text{extr-k}} = A_0 \times a \times H^m \times \left(\ln \frac{A_0}{A_1} \right)^n$$

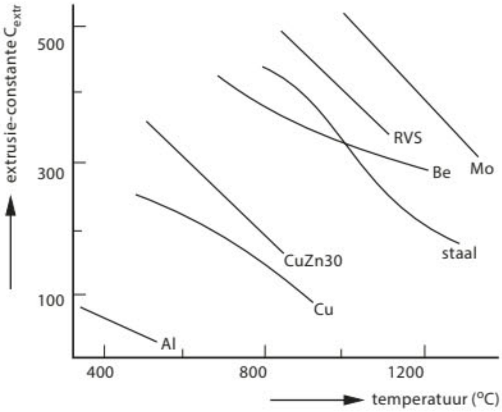
waarin A_0 en A_1 respectievelijk de doorsneden zijn van het uitgangsblok en van het product. In deze formule stelt H de materiaalhardheid in HV voor en zijn a en m constanten, terwijl n de verstevigingsexponent is.
In het geval van warmextrusie geldt voor de kracht:

$$F_{\text{extr-w}} = A_0 \times c_{\text{extr}} \times \ln \frac{A_0}{A_1}$$

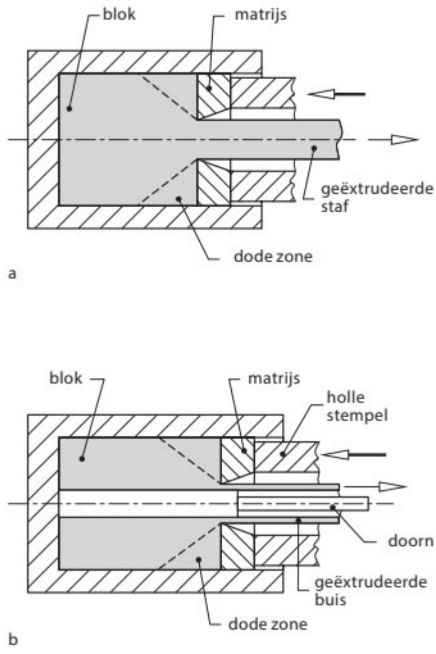
In figuur 4.15 hebben we het verloop van de waarde van de extrusieconstante c_{extr} als functie van de temperatuur voor een aantal materialen weergegeven.



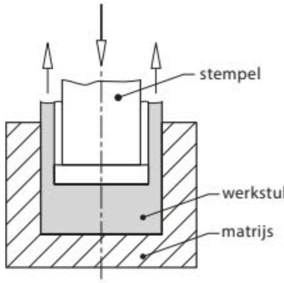
Figuur 4.14 De 'seat-rail' van een passagiersvliegtuig (a) en het daarvoor gebruikte extrusieprofiel (Al-legering, circa 80×40 mm) (b)



Figuur 4.15 De extrusieconstante voor diverse metalen



Figuur 4.16 Tegenlopende extrusie van staf (a) en van buis (b)



Figuur 4.17 Hulsextrusie

Bij **tegenlopend extruderen** beweegt het materiaal zich tegen de stempelbeweging in (zie figuur 4.16). Op deze wijze kunnen zowel massieve als holle profielen worden gemaakt. Het voordeel is dat het blok werkstukmateriaal zich nu niet verplaatst ten opzichte van de matrijs, waardoor er nauwelijks wrijving optreedt en de extrusiekracht geringer is. Daarentegen is bij tegenlopend extruderen het holle stempel minder stijf en is het geëxtrudeerde eindproduct moeilijker te ondersteunen bij het verlaten van de matrijs dan bij meelopend extruderen.

Hulsextrusie is een vorm van tegenlopende extrusie waarbij het niet-geëxtrudeerde restant van de blenk de bodem van het product vormt (zie figuur 4.17). Dit is dus een cyclisch verlopend proces. De wand van het hulsvormige product kan zeer dun zijn, zelfs minder dan 1% van de productdiameter. De wrijving vormt dan de fysische begrenzing van het proces. Toepassingsvoorbeelden zijn zachtmetalen tubes en batterijbehuizingen.

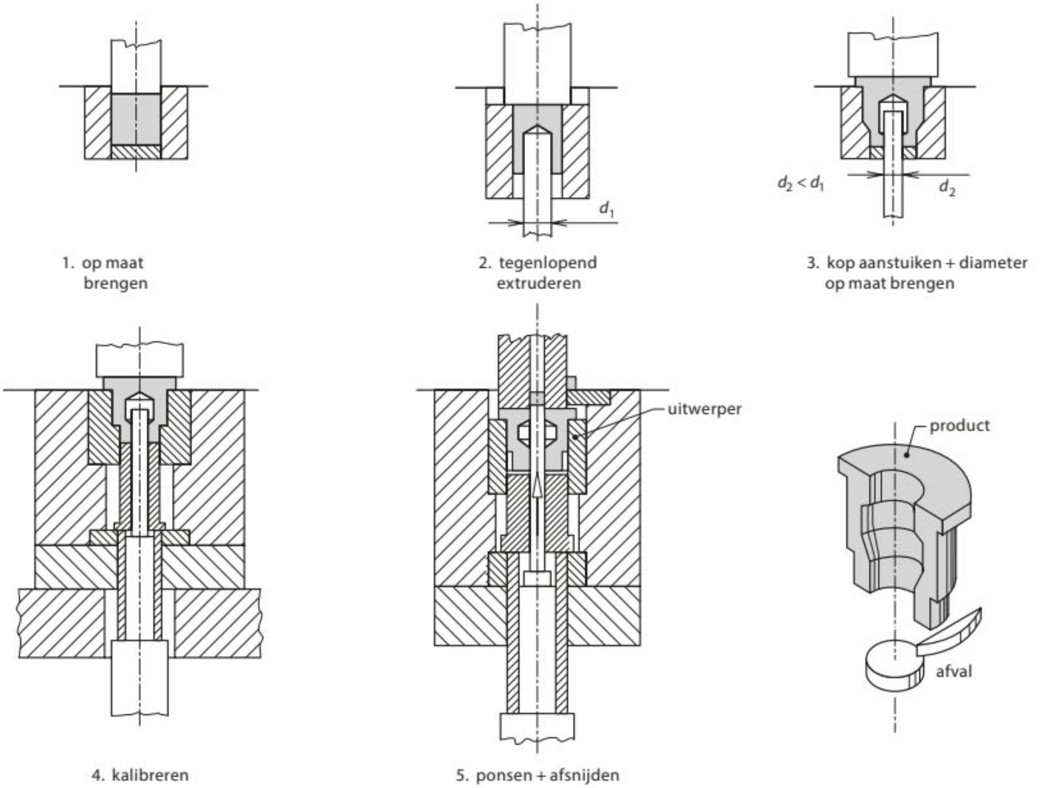
Voor metalen en legeringen die bij kamertemperatuur onvoldoende omvormbaar zijn, wordt het extrusieproces op hogere temperatuur uitgevoerd. Een andere reden om warm te extruderen zouden de lagere proceskrachten kunnen zijn, en in verband hiermee de grotere haalbare oppervlaktereducties. Extrusie bij hogere temperatuur heeft echter ook nadelen. De gereedschapsslijtage kan bijvoorbeeld zeer groot zijn. Daarom worden snel slijtende gereedschapsonderdelen meestal zo gemaakt dat ze gemakkelijk uitwisselbaar zijn.
Tenzij het uitgangsblok in een oven met schutgas verhit is, ontwikkelt zich hierop een oxidelaag. Deze oxidelaag beïnvloedt het wrijvingsgedrag tussen het gereedschap en het werkstukmateriaal, en daarmee ook de oppervlaktekwaliteit van het eindproduct. Naarmate de omvormtemperatuur stijgt, levert de noodzakelijke smering van het proces steeds meer problemen op. Vloeibaar glas is een voortreffelijk smeermiddel voor het warm extruderen van staal en hittebestendige legeringen.

De meeste lange geëxtrudeerde producten hebben een correctiebewerking nodig. Dit geldt vooral voor producten met een kleine doorsnede en voor producten die warmgeëxtrudeerd zijn. De rechtheid kan door koud natrekken aanzienlijk worden verbeterd, en verdraaiingen kunnen door torderen worden gecorrigeerd.
Koudextrusie wordt vaak als gecombineerde techniek toegepast. Meelopende en tegenlopende extrusie, soms zelfs samen met koudsmeden, worden dan in één bewerking gecombineerd. Zo zijn discrete producten te vervaardigen met een goede maatnauwkeurigheid, oppervlaktekwaliteit en sterkte, en bovendien met een grote vrijheid in vormgeving. Figuur 4.18 laat een voorbeeld zien van een product dat op één machine in vijf stappen vervaardigd is.

Extrusie is een drukproces, waarbij je geen insnoering in het materiaal hoeft te verwachten. De maximaal toelaatbare vlaktedruk op het gereedschap en de wrijving fungeren daardoor als begrenzing van het proces. In dit verband is zowel de keuze van het gereedschapsmateriaal als van het smeermiddel essentieel.

Bij **hydrostatische extrusie** wordt de benodigde drukkracht door een vloeistof op het blok overgebracht (zie figuur 4.19b). Dit medium omsluit het uitgangsmateriaal, waardoor de wrijvingskrachten nagenoeg nul zijn. Een ander zeer gunstig gevolg hiervan is dat de radiale en de axiale (druk)spanningen in het blok gelijk zijn. Moeilijk omvormbare materialen zoals zink, wolfram en gietijzer kunnen door de hydrostatische spanningstoestand toch geëxtrudeerd worden.

Een vergelijking tussen walsen en extruderen van profielen leidt tot de volgende conclusies:
- Bij walsen zijn grotere profieldoorsneden mogelijk dan bij extruderen.
- Bij extruderen is de vrijheid in vormgeving groter dan bij walsen.
- Door het aanbrengen van uitsparingen in de walsrollen kan een gewalst profiel van ribbels voorzien worden. Dit wordt bijvoorbeeld gebruikt bij betonstaal.
- Een extrusiematrijs is aanzienlijk goedkoper dan een overeenkomstige set walsrollen. Walsen



Figuur 4.18 Combinatie van extrusie met andere bewerkingen

wordt dan ook alleen maar toegepast voor genormaliseerde profielen; met extrusie kunnen ook door de klant gespecificeerde profielen, in relatief kleine hoeveelheden, economisch verantwoord worden vervaardigd. Denk hierbij aan een productievolume in de orde van grootte van duizend meter.

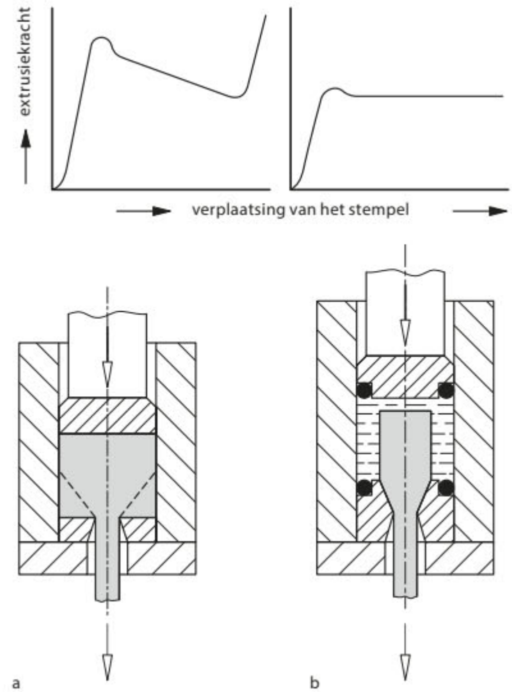
- Bij extruderen, zowel warm als koud, is aluminium het meest geschikte materiaal. Ook staal, zelfs gelegeerd staal en roestvast staal, kan in principe echter geëxtrudeerd worden.

4.4.3 Trekken

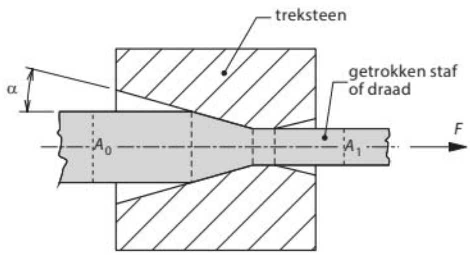
Trekken is een omvormproces waarbij de dwarsdoorsnede van een massieve staaf, draad of buis wordt gereduceerd en/of van vorm verandert, door het uitgangsmateriaal door een matrijs of treksteen te trekken (zie figuur 4.20). Op deze wijze kunnen verschillende massieve profielen getrokken worden, uitgaande van een walsdraad met een ronde of vierkante doorsnede (zie figuur 4.21). Ook buis (met een diameter tot circa 0,3 m) kan door middel van trekken in wanddikte en/of diameter worden gereduceerd (zie figuur 4.22). Men gaat dan uit van dikkere buis die door middel van walsen, extruderen of rolprofileren (zie paragraaf 4.5.1) vervaardigd is.

Bij trekken is versteviging essentieel voor een goed procesverloop, omdat de trekkracht in feite op de kleinste materiaaldoorsnede wordt uitgeoefend en daarbij geen verdergaande plastische rek in de getrokken draad mag optreden. Daarom kan trekken alleen koud worden uitgevoerd.

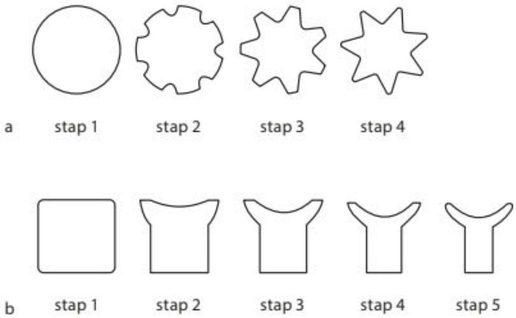
Het trekgereedschap heeft een conisch gedeelte, waarin de feitelijke reductie plaatsvindt, en een cilindrisch kalibreerdeel. De vervorming komt tot stand onder invloed van een axiale trekspanning in combinatie met de radiale drukspanningen in de deformatieconus. Om wrijving te verminderen moet de matrijs glad en hard zijn en goed gesmeerd worden.
Bij het trekken van grote lengtes draad neemt de binnendiameter van de treksteen langzamerhand toe door slijtage. De matrijs kan dan alleen



Figuur 4.19 Vergelijking tussen conventioneel meelopende (a) en hydrostatische extrusie (b)



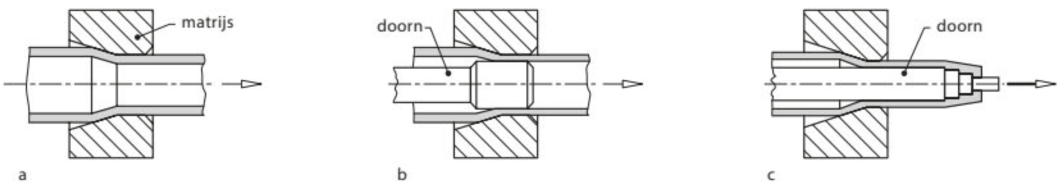
Figuur 4.20 Trekken



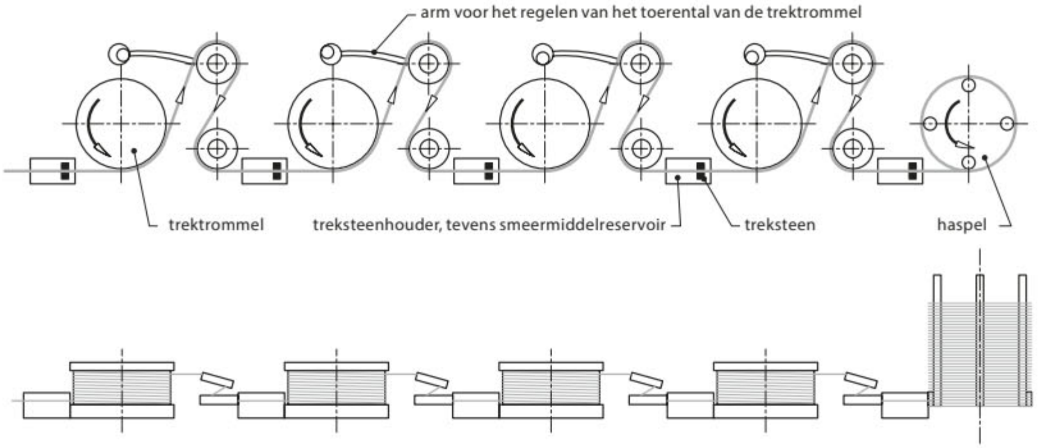
Figuur 4.21 In meerdere stappen getrokken producten (a,b)

nog op een grotere diameter worden nageslepen. Trekstenen worden vervaardigd van speciaal gereedschapsstaal, hardmetaal, PCBN (polykristallijn kubisch boriumnitride, zie paragraaf 2.5) en voor kleine diameters zelfs diamant (zie paragraaf 2.7). Bij trekken is het uitgangsmateriaal in de regel draad met een diameter van 8 à 10 mm, staf of buis. Behalve staal kunnen ook metalen als koper, aluminium en hun legeringen, en zelfs wolframdraad worden getrokken.

De doorsnedereductie per trekstap ligt meestal rond 20%, maar kan soms meer dan 40% bedragen. Hoe groter de verstevigingsexponent, des te groter de haalbare reductie. De begrenzing wordt bepaald door de rekgrens van het getrokken profiel. Grotere reducties zijn mogelijk door een aantal trekstenen achter elkaar te plaatsen. Als de taaiheid van het materiaal na een aantal trekstappen te gering wordt, moet het materiaal een gloeibehandeling ondergaan voordat er weer verder getrokken kan worden. De treksnelheid varieert van zo'n 1-2 m/s voor zware staven en tot 100 m/s voor dunne draad. Bij hoge treksnelheden neemt de temperatuur van de draad aanzienlijk toe, waardoor de (gewenste) versteviging beperkt wordt.
Er zijn in principe twee soorten trekmachines. Een trekbank met één enkele matrijs, die wordt gebruikt



Figuur 4.22 Het reduceren van buis door middel van trekken zonder doorn (a), met stilstaande doorn (b) en met bewegende doorn (c)



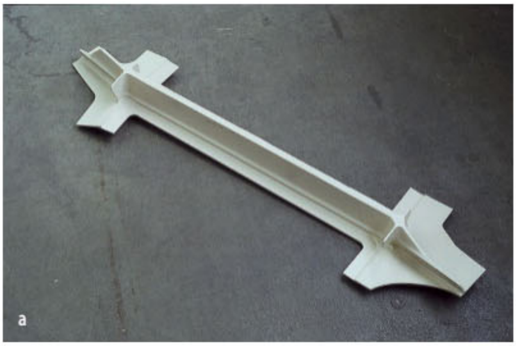
Figuur 4.23 Het trekken van draad in meerdere stappen met tussenaandrijving

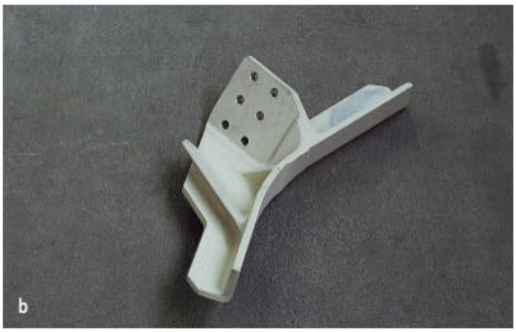
voor het trekken van staven en buizen van beperkte lengte, en machines met meerdere trekstenen en meerdere aangedreven trektrommels (zie figuur 4.23). Op deze laatste machines wordt vaak kilometers lange draad getrokken in meerdere stappen.

4.4.4 Smeden

Smeden is de verzamelnaam van cyclisch verlopende omvormprocessen waarbij het werkstuk door drukkrachten wordt omgevormd. In tegenstelling tot de omvormprocessen die we hiervoor bespraken (walsen, extruderen en trekken) is smeden een vervaardigingsmethode voor discrete producten. In vergelijking met gegoten materiaal is gesmeed materiaal sterker en taaier, als gevolg van een aanmerkelijk betere homogeniteit en een fijnere structuur. Het smeedproces is dan ook geschikt voor de fabricage van hoog belaste constructieonderdelen, zoals onderdelen van de wielophanging en aandrijfcomponenten van auto's, landingsgestellen en andere vliegtuigonderdelen. In figuur 4.24 zie je twee verstijvingselementen van een passagiersvliegtuig; beide bevinden zich tussen de zijramen van de cockpit.

Hoewel smeden in het algemeen een warmomvormproces is, kan het ook op kamertemperatuur worden uitgevoerd. Warmsmeden vereist een relatief lage drukbelasting. De bijbehorende maatnauwkeurigheid en oppervlaktekwaliteit zijn echter ook matig. Daarom moeten warmgesmede producten in het algemeen nog een mechanische nabewerking ondergaan. Koudsmeden (vaak ook koudpersen genoemd) kenmerkt zich door hoge proceskrachten. Het werkstukmateriaal moet hiervoor voldoende ductiliteit op kamertemperatuur hebben. Koudgesmede producten hebben een goede oppervlaktekwaliteit en maatnauwkeurigheid.





Figuur 4.24 Matrijsgesmede vliegtuigonderdelen: raamstijl (Al-legering, circa 940 mm lang) (a) en 'boomerang' (Al-legering, circa 300×100 mm) (b)

Smeedbewerkingen kunnen in twee hoofdgroepen worden onderverdeeld, afhankelijk van het type gereedschap:

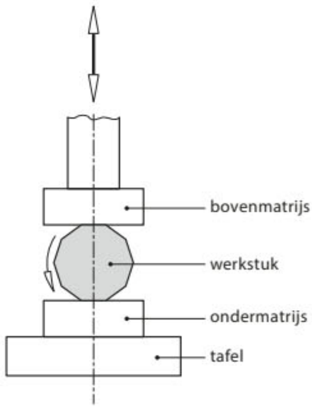
- **vrij smeden**, waarbij de vorm van het werkstuk niet of slechts gedeeltelijk is vastgelegd in het gereedschap en door het manipuleren van het werkstuk ten opzichte van het gereedschap moet worden verkregen;
- **matrijssmeden**, waarbij alle benodigde geometrische informatie van het smeedstuk in het gereedschap is vastgelegd.

Vrij smeden wordt bij grotere werkstukken machinaal uitgevoerd (zie figuur 4.25). Bij het eenvoudigste proces, het **stuiken**, wordt een werkstuk tussen een vlakke onder- en bovenmatrijs door een drukkracht in hoogte gereduceerd. Als gevolg van de wrijving in het werkstuk en gereedschap (en bij warmstuiken eventueel ook als gevolg van de temperatuurverdeling) zal een tonvormig werkstuk ontstaan (zie figuur 4.26). Om dit effect te minimaliseren moet voor een effectieve smering gezorgd worden. Door het gereedschap voor te verwarmen koelt het werkstukmateriaal op het contactvlak minder af. De deformatieweerstand, en dus ook de wrijving, neemt hierdoor minder toe.
De benodigde kracht voor het warm stuiken van een cilindrisch werkstuk is te bepalen met de betrekking:

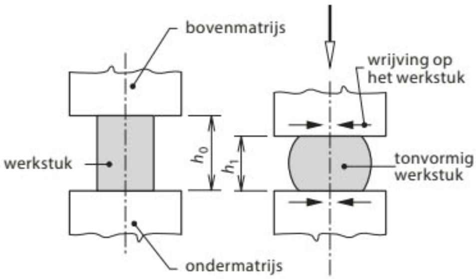
$$F_{\text{stuik}} = R_e \times \pi \times \frac{d_1^2}{4} \times \left(1 + \frac{\mu \times d}{3 \times h_1}\right)$$

waarin R_e de vloeigrens is van het werkstukmateriaal, μ de wrijvingscoëfficiënt tussen het werkstuk en het gereedschap is en d_1 en h_1 respectievelijk de diameter en de hoogte van het product zijn. In de vergelijking vertegenwoordigt het rechtergedeelte van de term tussen haakjes de invloed van de wrijving.
Het vrij smeden wordt meestal in een aantal stappen uitgevoerd. Hierdoor blijven de smeedkrachten per stap beperkt en is de benodigde capaciteit van de machine lager. Omdat voor vrij smeden geen kostbaar, productgebonden gereedschap nodig is, kunnen op deze wijze zeer grote werkstukken voor een gunstige prijs vervaardigd worden. Afhankelijk van de configuratie kunnen we onderscheid maken tussen stuiken, **rekken** en **rondsmeden** (zie figuren 4.26 en 4.27).

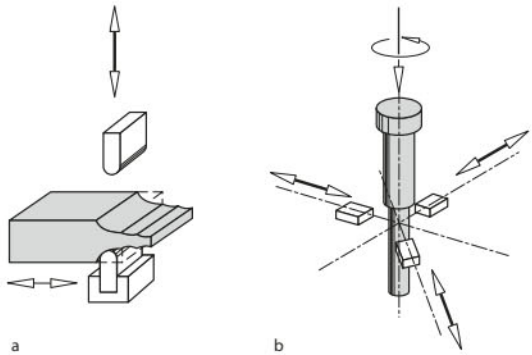
Bij matrijssmeden wordt in de regel gebruikgemaakt van een gesloten matrijs met braamspleet



Figuur 4.25 Vrij smeden

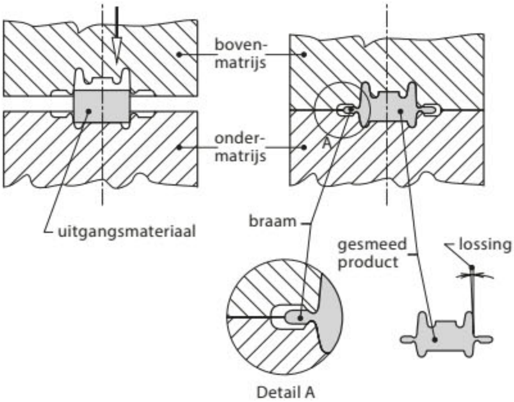


Figuur 4.26 Stuiken



Figuur 4.27 Rekken (a) en rondsmeden (b)

(zie figuur 4.28). Het smeedproduct wordt gevormd door de sluitbeweging van de bovenmatrijs naar de ondermatrijs waarin zich het uitgangsmateriaal bevindt. Om de matrijsholte geheel met materiaal te vullen is een bepaald volume aan materiaal nodig. In de praktijk blijkt het vaak een probleem om dit volume met de vereiste nauwkeurigheid te verkrijgen. Om er zeker van te kunnen zijn dat de matrijsholte geheel wordt gevuld, dient



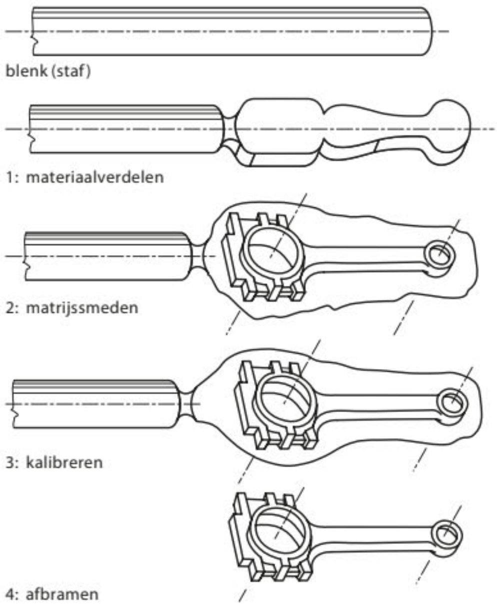
Figuur 4.28 Matrijssmeden

het uitgangsmateriaal een iets groter volume te bevatten dan het volume van de matrijsholte. Het overtollige materiaal vloeit tussen de vormholte uit en vormt een **braam**. Om dit overtollige materiaal in de braamspleet te drukken dient een hoge wrijvingsweerstand overwonnen te worden. Ook koelt het materiaal ter plaatse van de braam af. Beide verschijnselen zorgen ervoor dat de druk in de matrijsholte aanzienlijk toeneemt. Dit bevordert een complete vulling van de holte.

Het uitgangsmateriaal is warmgewalste staf van een bepaalde lengte. Meestal zal het gewenste product via meerdere tussenstappen worden vervaardigd. Per stap wordt de materiaalverplaatsing namelijk beperkt door de grootte van de perskracht. Voor iedere stap is een aparte matrijs(holte) nodig. De eerste persstappen zijn gericht op het verdelen van het materiaal. Vervolgens wordt de ruwe vorm aangebracht. Daarna wordt de uiteindelijke vorm bereikt. Ten slotte wordt de braam afgesneden. Soms is een warmtebehandeling vereist, en/of een kalibratiestap (in een nauwkeurige matrijs). Figuur 4.29 laat de verschillende stadia bij het smeden van een drijfstang zien.

Bij het vaststellen van de opwarmtemperatuur van het materiaal moet men rekening houden met warmteverliezen tijdens het wachten en transport. Voordat het opgewarmde materiaal in de matrijs geplaatst wordt, moet de oxidehuid verwijderd worden om de matrijs te sparen. Dit gebeurt door borstelen of spuiten met water onder druk.

Om economische redenen streeft men bij het smeden naar een steeds grotere nauwkeurigheid.

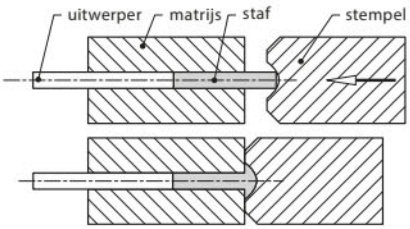


Figuur 4.29 Het smeden van een drijfstang

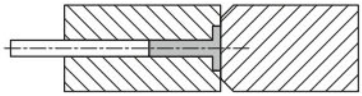
Hierdoor is minder nabewerking nodig. Dit proces wordt **precisiesmeden** (*precision forging* of *near-net-shape forging*) genoemd. Hierbij hoeft slechts een minimale hoeveelheid overtollig materiaal te worden verwijderd. Dit proces vraagt om meer tussenstappen, grotere proceskrachten en een aangepast matrijsontwerp. Ook worden er hogere eisen gesteld aan de maatvoering en de eigenschappen van het uitgangsmateriaal, en aan de beheersing van de temperatuur. Vanwege hun lage omvormweerstand zijn aluminium- en magnesiumlegeringen het meest geschikt voor dit proces. Het precisiesmeden van staal is aanzienlijk moeilijker, maar wordt in de praktijk bijvoorbeeld toegepast bij de productie van tandwielen, drijfstangen en turbinebladen.

Bij het **munten** worden de vorm van de ondermatrijs en die van de bovenmatrijs (gravures) gelijktijdig in het werkstukmateriaal geperst. Het werkstukmateriaal is daarbij zijdelings in een ring opgesloten. Munten is een voorbeeld van een braamloos koudsmeedproces.

Kopstuiken is een smeedproces dat wordt uitgevoerd op het uiteinde van een staf of draad. Met behulp van een stuikmatrijs wordt plaatselijk een vormverandering aangebracht (zie figuur 4.30). Gevaar voor knik begrenst de uitsteeklengte en daarmee het volume van de kop.



a kop gevormd in de stempel



b kop gevormd in de matrijs

Figuur 4.30 Kopstuiken

Het gereedschap voor matrijssmeden bestaat uit een boven- en een ondermatrijs. Deze matrijshelften worden uit één stuk gemaakt of opgebouwd uit meerdere delen die in een matrijshouder zijn geplaatst. Soms moet een matrijshelft noodgedwongen gedeeld worden, zodat niet-lossende vormen uit de matrijs kunnen worden genomen. Richtlijnen voor het ontwerpen van smeedmatrijzen zijn in [4.1] te vinden. Het gereedschapsmateriaal moet taai zijn, slijt- en warmvast, en bestand tegen belasting- en temperatuurwisselingen. De levensduur van het gereedschapsmateriaal zal beperkt zijn, doordat er oppervlaktescheuren en maatafwijkingen door slijtage ontstaan. De contacttijd tussen het hete werkstukmateriaal en de matrijs speelt hierbij een belangrijke rol. Bij eenvoudige werkstukken haalt men met gereedschappen van Cr-Ni-staal 10.000 tot 20.000 producten en met matrijzen van Cr-W-staal 20.000 tot 50.000 producten. Bij complexe werkstukken kan de levensduur van de matrijs tot 50-70% korter zijn.

Smeren vermindert de wrijving en dus ook de slijtage. Dit heeft een gunstige invloed op de proceskracht en de verdeling van het materiaal in de matrijsholte. De smeerfilm kan ook dienen als warmte-isolator tussen het hete werkstuk en het relatief koude gereedschap. Zo wordt de afkoeling van het werkstuk vertraagd, waardoor er een betere rekverdeling in het materiaal ontstaat. Verder voorkomt een smeermiddel dat producten aan de matrijs hechten.

4.5 Omvormen van plaat

Bij het omvormen van plaat zijn de spanningen loodrecht op het vlak van de plaat in het algemeen verwaarloosbaar ten opzichte van de spanningen in het vlak van de plaat. In het vlak van de plaat worden trekkrachten uitgeoefend, of een combinatie van trek- en drukkrachten. De strekprocessen onder invloed van trekspanningen worden begrensd door het insnoerverschijnsel (gevolgd door breuk). Drukspanningen in het vlak van de plaat kunnen tot ongewenste **plooivorming** leiden.

Door deze spanningen en begrenzingen (insnoering en plooivorming) is het beoordelen van de geschiktheid van een plaatmateriaal voor omvormprocessen moeilijker dan bij massief omvormen. De grensvervormingskromme voor een plaatmateriaal (zie figuur 2.13) geeft de begrenzing voor de mogelijke deformatie weer bij verschillende plaatomvormprocessen en bij uiteenlopende samengestelde belastingen. Voor materialen met een lagere verstevigingsexponent of met een grotere voordeformatie verschuift de kromme naar beneden.

Als het gaat om de eigenschappen van het uitgangsmateriaal spelen verschillende factoren een belangrijke rol. Niet alleen de verstevigingsexponent en de voordeformatie, maar ook de anisotropie. Een hoge waarde van de verstevigingsexponent en een geringe voordeformatie zijn gunstig voor de omvormbaarheid. Door anisotropie (zie paragraaf 2.3.5) is de omvormbaarheid van het plaatmateriaal richtingsafhankelijk. De normaalanisotropie R_n geeft de verhouding weer tussen de omvormbaarheid in het vlak van de plaat ten opzichte van die loodrecht op het vlak van de plaat. Voor koudgewalst koolstofstaal geldt een normaalanisotropie van $1{,}3 < R_n < 2{,}1$. De planaire anisotropie R_p is maatgevend voor de omvormbaarheidsverschillen in het vlak van de plaat. Dieptrekken van plaat met een $R_p \neq 0$ leidt tot oorvorming (zie figuur 2.16). Als de gegolfde rand van het diepgetrokken product niet toelaatbaar is, vraagt dit om een extra nabewerking in de vorm van nasnijden (trimmen).

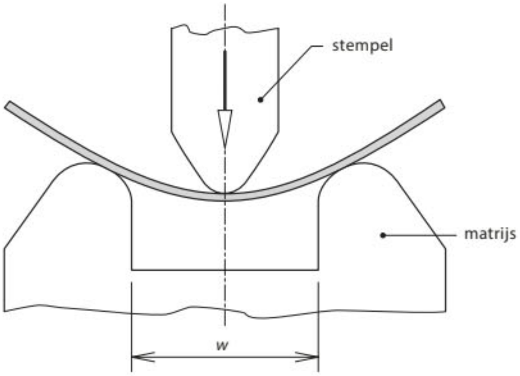
4.5.1 Buigen

Buigen is een omvormproces waarbij het materiaal onder invloed van een buigmoment aan één zijde plaatselijk rekt en aan de andere zijde stuikt. Buigen wordt toegepast voor plaat, strip, draad, buis en

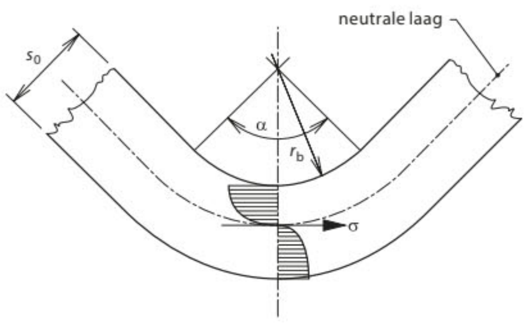
profiel. In deze paragraaf onderscheiden we vrij buigen, matrijsbuigen, strijkbuigen, zwenkbuigen, rolbuigen en rolprofileren.

Bij het **vrij buigen** wordt een plaat met behulp van een buigstempel in een matrijsopening net zolang doorgezet tot er een driepuntsbuiging optreedt (zie figuur 4.31). In figuur 4.32 zie je het spanningsverloop in de doorsnede van de plaat. Aan de buitenzijde treden tangentiële trekspanningen op, aan de binnenzijde tangentiële drukspanningen en in de overgangszone bevindt zich een spanningsvrije **neutrale laag**. In het begin van het buigproces zal deze neutrale laag in het midden van de plaat liggen, maar zodra de binnenradius van de gebogen plaat r_b kleiner wordt dan enkele malen de plaatdikte s_0 (ook afhankelijk van het werkstukmateriaal), zal de neutrale laag naar de binnenzijde gaan verschuiven.

De buigradius r_b wordt van twee kanten begrensd. Enerzijds neemt de rek in de buitenste vezellaag toe naarmate de r_b/s_0-verhouding afneemt. Om mogelijke insnoering en scheurvorming te voorkomen, mag de buigradius nooit kleiner worden



Figuur 4.31 Vrij buigen



Figuur 4.32 Buigspanningen

dan een bepaalde minimumwaarde. Deze waarde is afhankelijk van het materiaal en de plaatdikte. De buigradius moet echter wel klein genoeg zijn om ook dicht bij de neutrale laag plastische deformatie te verkrijgen.

Tijdens het buigen maakt de inwendige spanningsverdeling evenwicht met het uitwendige buigend moment. Bij ontlasten zal het materiaal elastisch **terugveren** om het inwendige momentenevenwicht te herstellen (zie figuur 4.33). Deze terugvering neemt toe naarmate de r_b/s_0-verhouding en de vloeigrens R_e toenemen en de elasticiteitsmodulus E afneemt. De invloed van de verschuiving van de neutrale laag wordt met de constante c_a weergegeven, waarbij voor $r_b \geq 2s_0$ met $c_a = 0{,}5$ gerekend wordt, en voor $r_b < 2s_0$ met $c_a = 0{,}33$. De **terugveerhoek** wordt aangegeven met α_t. Als functie van de buighoek α_b geeft dit:

$$\alpha_t = 3 \times \frac{R_e}{E} \times \frac{r_b + c_a \times s_0}{s_0} \times \alpha_b$$

De resulterende hoek na het terugveren is:

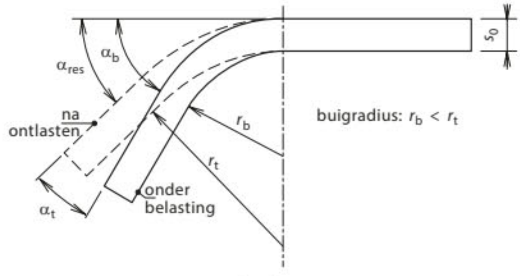
$$\alpha_{res} = \alpha_b - \alpha_t$$

Een eenvoudige schatting van de **buigkracht** bij vrij buigen onder 90° kan worden verkregen met de formule:

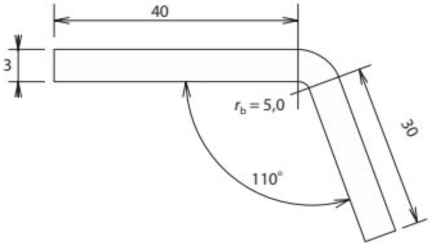
$$F_b = c_b \times \frac{b \times s_0^2 \times R_m}{w}$$

waarin b de breedte van de strip (de lengte waarover gebogen wordt) is, R_m de treksterkte en w de breedte van de buigopening (zie figuur 4.31). De waarde van c_b ligt tussen de grenzen $0{,}75 < c_b < 1{,}2$.Voor het zuivere vrij buigen (driepuntsbuiging) geldt $c_b = 0{,}75$ en voor het buigen met enig nadrukken is $c_b = 1{,}2$.

Ter illustratie volgt hier een rekenvoorbeeld voor



Figuur 4.33 Terugvering na het buigen



Figuur 4.34 Gebogen strip van het rekenvoorbeeld

het buigen met enig nadrukken van een strip. De gewenste afmetingen van deze strip vind je hieronder en in figuur 4.34.

Je beschikt over de volgende gegevens:
- Stripdikte $s_0 = 3{,}0$ mm
- Stripbreedte $b = 50$ mm
- Breedte van de buigopening $w = 20$ mm
- Buigradius $r_b = 5{,}0$ mm
- Rekgrens van het werkstukmateriaal $R_e = 350$ MPa
- Treksterkte van het werkstukmateriaal $R_m = 520$ MPa
- Elasticiteitsmodulus van het werkstukmateriaal $E = 210$ GPa

Beantwoord de volgende vragen:

a Wat zijn de vereiste afmetingen van het uitgangsmateriaal?
b Hoe groot is de aangegeven hoek (110°) na het terugveren?
c Bereken de grootte van de buigkracht F_b.

Oplossing:

a $l = l_1 + l_2 + 2 \times \pi \times (r_b + c_a \times s_0) \times \frac{\alpha_b}{360} \qquad \alpha_b = 70°$

$r_b = 5{,}0 \text{ mm} < 2 \times s_0 = 2 \times 3{,}0 = 6{,}0 \text{ mm} \rightarrow c_a = 0{,}33$

$l = 40 + 30 + 2 \times \pi \times (5{,}0 + 0{,}33 \times 3{,}0) \times \frac{70}{360}$

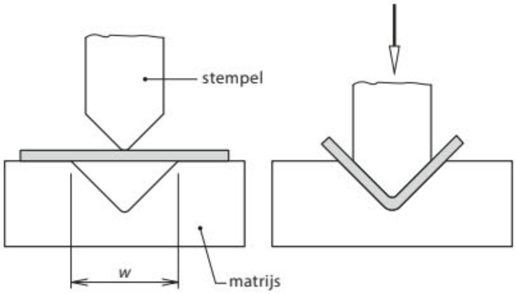
$= 40 + 30 + 7{,}32 = 77{,}32 \text{ mm}$

Stripafmetingen: $77{,}32 \times 50$ mm

b $\alpha_t = 3 \times \frac{350}{210000} \times \frac{5{,}0 + 0{,}33 \times 3{,}0}{3{,}0} \times 70 = 0{,}70°$

Hoek na terugvering $\alpha = 110° + 0{,}7° = 110{,}7°$

c $F_b = 1{,}2 \times \frac{50 \times 3{,}0^2 \times 520}{20} = 14040 \text{ N} = 14{,}04 \text{ kN}$

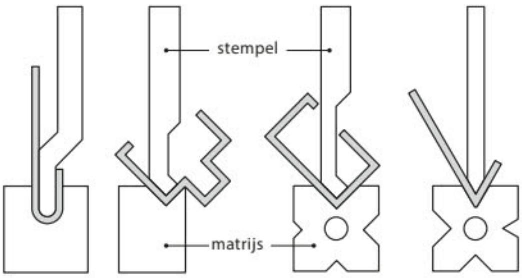


Figuur 4.35 Matrijsbuigen

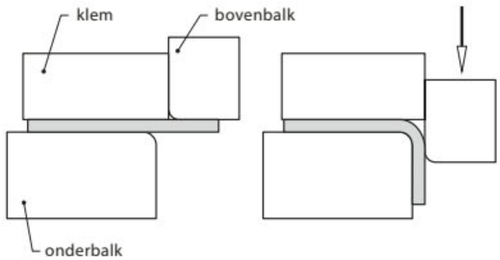
Het essentiële verschil tussen **matrijsbuigen** (zie figuur 4.35) en vrij buigen is dat de plaat in de matrijs bij matrijsbuigen zodanig wordt doorgedrukt dat de kracht in de laatste fase op het gehele contactoppervlak wordt uitgeoefend. Matrijsbuigen vereist hierdoor een meer dan twee keer grotere kracht dan vrij buigen. Door de grotere plastische zone zal de terugvering veel geringer zijn. Matrijsbuigen is nauwkeuriger dan vrijbuigen, maar vraagt voor iedere buighoek, materiaaldikte en materiaalsoort om een aparte gereedschapsset. Vrij buigen is minder nauwkeurig dan matrijsbuigen, maar het gebruikte gereedschap is relatief eenvoudig en goedkoop, en kan bovendien veel flexibeler worden ingezet.

Vrij buigen en matrijsbuigen worden op een **kantpers** uitgevoerd. We gebruiken de term **kanten** voor alle buigbewerkingen waarbij de plaat door een bovengereedschap in een groef van het ondergereedschap wordt gedrukt. Beide plaatuiteinden komen hierdoor omhoog. Kantpersen zijn in de regel zo breed dat zij de te bewerken profiellengte over de hele lengte buigen (tot 16 m). Men verwerkt op deze machines plaatdikten van 0,5 mm tot 20 mm. Bij matrijsbuigen wordt aan de beweegbare bovenbalk een buigstempel bevestigd en op de vaste onderbalk een ondermatrijs. Figuur 4.36 toont een aantal profielen dat op een kantpers kan worden gebogen.

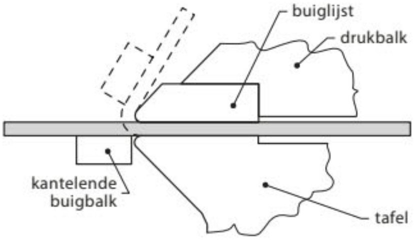
Bij **strijkbuigen** (zie figuur 4.37) wordt de plaat op de onderbalk geklemd en verplaatst de bovenbalk zich ten opzichte van de onderbalk verticaal omlaag. Dit proces is bijzonder geschikt voor het buigen van kleine opstaande randen aan lange werkstukken. Men kan bovendien snel werken, onder meer omdat de plaat vlak op de tafel ligt.
Bij matrijs- en strijkbuigen ligt de buighoek vast in de gereedschapsgeometrie.



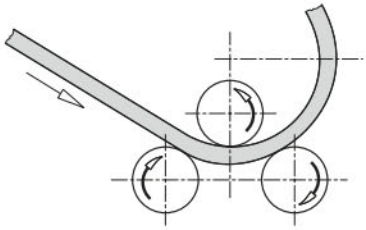
Figuur 4.36 Op een kantpers te buigen profielen



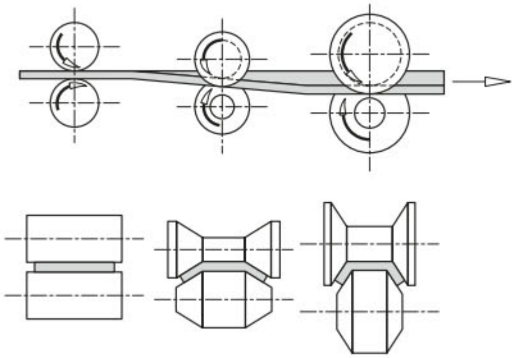
Figuur 4.37 Strijkbuigen



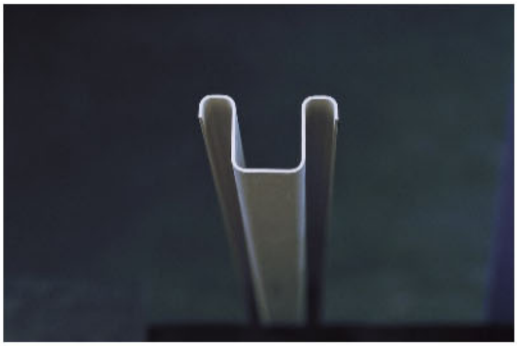
Figuur 4.38 Zwenkbuigen



Figuur 4.39 Rolbuigen



Figuur 4.40 Rolprofileren

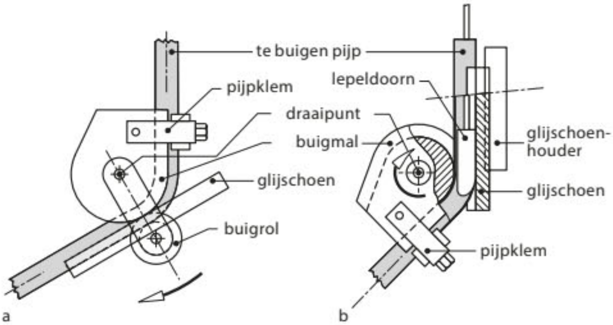


Figuur 4.41 Gerold aluminium profiel, dikte 1,4 mm

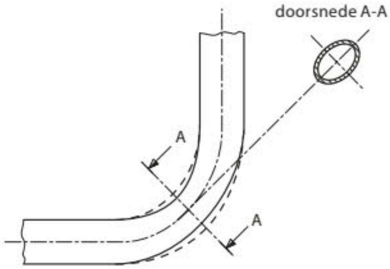
Door middel van **zwenkbuigen** worden hoeken met een kleine buigradius in plaatmateriaal aangebracht op een **zetbank**. Hierbij wordt de (dunne) plaat met behulp van een kantelende buigbalk in de gewenste hoek gebogen (zie figuur 4.38). Strijkbuigen en zwenkbuigen zijn moeilijk beheersbare processen door de wrijving. Dit kan een grote spreiding in de buighoek tot gevolg hebben. Daarnaast kan het product erdoor beschadigen.

Bij **rolbuigen** worden plaat en profiel met een relatief grote buigstraal door middel van buigrollen gebogen. Het materiaal wordt hierbij tussen drie buigrollen doorgevoerd, waarbij een driepuntsbuiging optreedt (zie figuur 4.39). Ter hoogte van de middelste rol heerst het maximale buigend moment M_b, dat de gewenste plastische vervorming veroorzaakt. Met dit proces kunnen ronde cilindermantels vervaardigd worden, en na schuinstelling van de buigwalsen ook conische werkstukken.

Bij rolbuigen wordt de doorvoerkracht geleverd door aandrijving van de buigwalsen. Via de wrijving wordt deze kracht op de plaat overgebracht. Voor het buigen van dikke plaat is dit proces niet bruikbaar, omdat de optredende wrijvingskracht niet toereikend is om de plaat door te voeren. Daarom wordt dikke plaat tussen twee vaste steunpunten met een buigstempel gebogen volgens het vrij-buigproces.



Figuur 4.42 Het buigen van pijp zonder (a) en met behulp van een doorn (b)



Figuur 4.43 Verandering van de doorsnede bij het buigen van een ronde pijp



Figuur 4.44 Gebogen aluminium pijpstuk ø 55 × 1 mm, met de daarvoor gebruikte flexibele doorn

Rolprofileren is een continu buigproces om bandmateriaal in een vrij groot aantal stappen met geprofileerde rollen in een gewenste profielvorm te brengen (zie figuur 4.40). De band wordt door de wrijving tussen de roterende walsrolparen doorgevoerd. Dit proces is alleen rendabel voor een groot productievolume. Een algemene toepassing is de fabricage van langsgelaste buis. In figuur 4.41 zie je een profiel dat wordt toegepast in de bagageruimte van een passagiersvliegtuig.

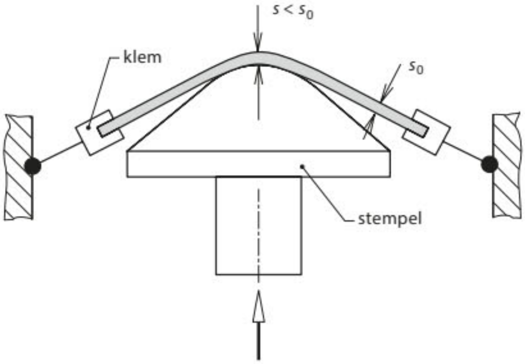
Het uitgangsmateriaal voor plaatbuigen is in de regel uitgesneden of afgeknipt plaat- en bandmateriaal. De door het snijden verstevigde randzone kan scheuren tijdens het buigen. Het risico hierop kan verminderd worden door het gloeien van de plaat, het verwijderen van de snijbramen en door dwars op de walsrichting te buigen.

Het **buigen van pijp** (zie figuur 4.42) en ander hol profielmateriaal vereist speciaal gereedschap. Bij het vrij buigen van een pijp treedt ter hoogte van de bocht een ongewenste vervorming van de doorsnede op (zie figuur 4.43). Om dit te voorkomen maakt men gebruik van flexibele doornen. In figuur 4.44 zie je een pijpstuk met de hiervoor gebruikte flexibele doorn. Pijpen met een grote diameter worden gevuld met zand. Om knikken tijdens het buigen te voorkomen, zal een zekere minimale buigradius moeten worden aangehouden voor de pijpdiameter en de wanddikte. Deze buigradius is afhankelijk van het materiaal.

4.5.2 Strekbuigen

Bij **strekbuigen** wordt een plaat of strip die aan de randen is ingeklemd in de gewenste vorm gerekt en gelijktijdig gebogen (zie figuur 4.45). Het werkstuk vervormt plastisch door de beweging van het stempel of vormblok. Het oppervlak van het plaatmateriaal wordt plaatselijk vergroot. Omdat het volume constant blijft, zal de plaatdikte afnemen. Tijdens de uitvoering van dit proces mag geen insnoering optreden. Daarom zijn vooral materialen met een grote verstevigingsexponent en een lage rekgrens er zeer geschikt voor. Bij strekbuigen is de dwarsrek ε_{W2} meestal zeer gering. De grensvervormingskromme (zie figuur 2.13) laat zien dat in dit geval de toelaatbare rek ε_{W1} een waarde heeft die aanzienlijk lager is dan de breekrek die uit de trekproef volgt. Voor een veelgebruikte aluminiumlegering geldt een maximale waarde van circa 7% in plaats van de breekrek van circa 18%.

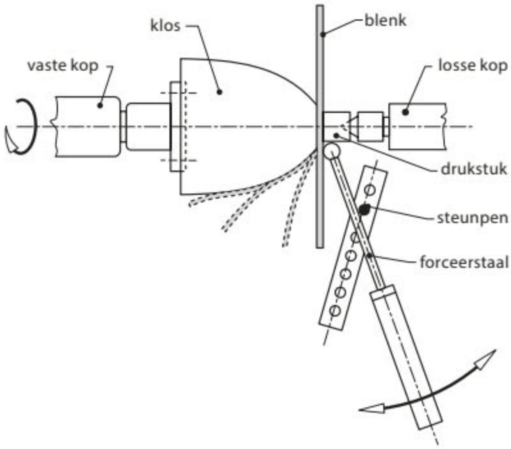
Strekbuigen wordt in de praktijk toegepast op dieptrekstaal, zilver, koper-, aluminium- en magnesiumlegeringen. Met dit proces kunnen zeer grote werkstukken (tot boven de 20 m²) met ondiepe, vaak dubbelgekromde vormen met grote kromtestralen



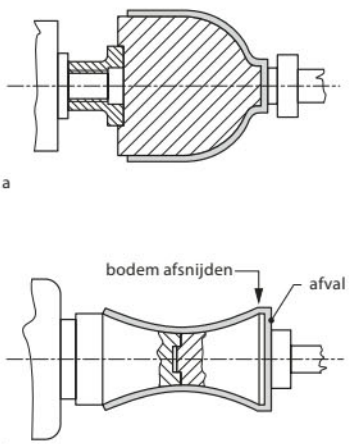
Figuur 4.45 Strekbuigen



Figuur 4.46 Gestrekt plaatonderdeel: de 'topskin' van de cockpit van een passagiersvliegtuig (Al-plaat, 3,2 mm dik, circa 1150×1400 mm)



Figuur 4.47 Forceren



Figuur 4.48 Forceerklossen: gewone (a) en gedeelde (b)

worden vervaardigd. Strekbuigen kenmerkt zich door een goede oppervlaktekwaliteit. Terugvering ontbreekt vrijwel geheel. Het werken met de kleminrichtingen is nogal omslachtig, en er is sprake van materiaalverlies door de inklemranden. Daarom is dit proces slechts rendabel voor producten die in kleine series worden vervaardigd. Het wordt voornamelijk toegepast in de vliegtuigindustrie en voor nulseries in de auto-industrie (nulseries zijn proeffabricages van een serieproduct op kleine schaal om het ontwerp en de productiemethode uit te testen). Een voorbeeld van een gestrekt dubbelgekromd plaatdeel is de 'topskin' (het dakje van de cockpit) van een passagiersvliegtuig (zie figuur 4.46). De gereedschappen voor strekbuigen zijn in het algemeen van zinklegeringen, staal, kunststof of (hard)hout vervaardigd.

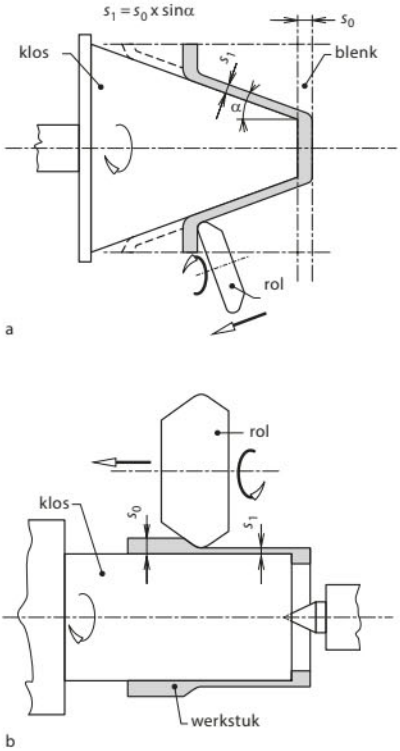
4.5.3 Forceren en vloeidraaien

Bij **forceren** wordt een vlakke of een voorgevormde ronde plaat tegen een draaiende mal (**klos**) gedrukt met behulp van een **forceerstaal** dat het materiaal langs de klos vervormt (zie figuur 4.47). Er ontstaat op deze wijze een omwentelingslichaam waarvan de inwendige vorm overeenkomt met de vorm van de klos. Een gelijkmatige wanddikte van het hele werkstuk kan worden bereikt door beurtelings te rekken en te stuiken. De blenk moet uiteraard een grotere diameter hebben dan het te vervaardigen product. Voor lossende werkstukken kunnen de klossen uit één stuk bestaan. In geval van ondersnijding zullen gedeelde klossen moeten worden toegepast (zie figuur 4.48).

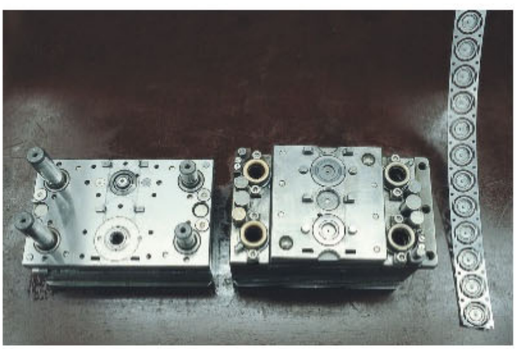
Bij forceren worden forceerrollen toegepast, en forceerstalen met divers gevormde uiteinden. In geval

van grote drukkrachten wordt het gereedschap niet handmatig, maar hydraulisch aangedreven.

Alle omvormbare materialen met een geringe versteviging kunnen worden geforceerd. Het proces wordt toegepast op plaat tot een diameter van 6 m. Moeilijk omvormbare materialen en materialen met grotere diktes (tot 150 mm) worden warm geforceerd. Bij plaat dunner dan 0,5 mm vormen in het algemeen plooivorming en golving een probleem.



Figuur 4.49 Vloeidraaien van een blenk (a) en van buis (b)



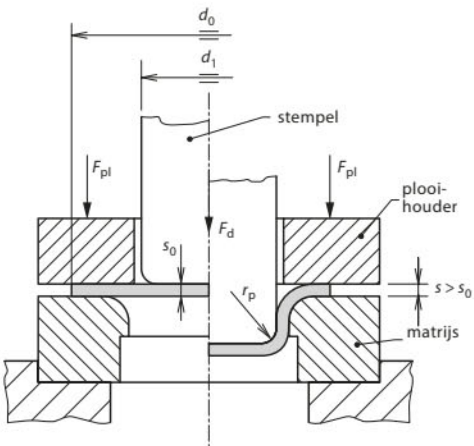
Figuur 4.50 Een van de matrijzen voor het dieptrekken van de Philips-scheerkappen (Cr-staal, 200×135×130+90 mm)

Vloeidraaien lijkt qua uitvoering op forceren. Bij vloeidraaien wordt echter, in tegenstelling tot bij forceren, onder invloed van een schuifbelasting doelbewust een aanzienlijke wanddiktevermindering gerealiseerd (zie figuur 4.49a). Vloeidraaien is dus eigenlijk een massief omvormproces. In het algemeen zal de maximale diameter van het product gelijk zijn aan die van de blenk. Bij een variant op dit proces gaat men uit van een buisvormige blenk (zie figuur 4.49b).

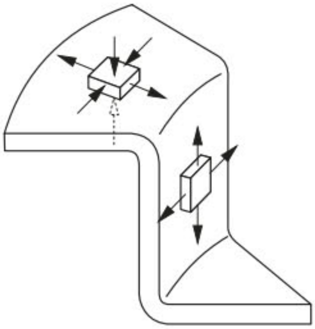
4.5.4 Dieptrekken

Dieptrekken is een omvormproces om producten met diverse gesloten contouren (rond, rechthoekig, ovaal enzovoort) uit plaatmateriaal te vervaardigen. De scheerkappen van het Philips-scheerapparaat worden bijvoorbeeld in meerdere stappen dieptrokken. In figuur 4.50 is een van de tien matrijzen te zien die hiervoor nodig zijn. In tegenstelling tot wat de benaming doet vermoeden, worden ook vrij ondiepe werkstukken (bijvoorbeeld carrosseriedelen) op deze wijze vervaardigd.

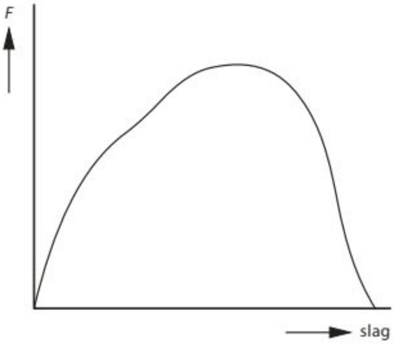
Bij het dieptrekken met **plooihouder** (zie figuur 4.51) trekt een stempel de rand van de blenk onder een plooihouder uit. Tegelijkertijd wordt het middendeel van de blenk door een trekring of matrijs getrokken, waarna de rest van de blenk volgt. De gemiddelde wanddikte van het product komt nagenoeg overeen met de dikte van de blenk.



Figuur 4.51 Dieptrekken met plooihouder



Figuur 4.52 Spanningsrichtingen bij het dieptrekken met plooihouder

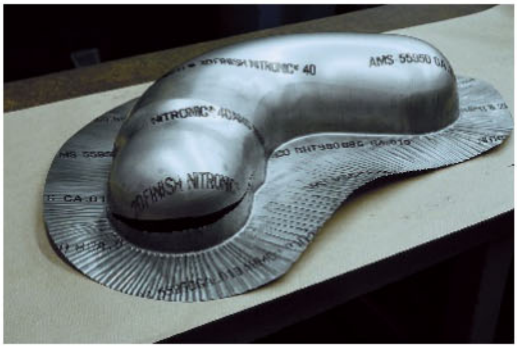


Figuur 4.53 Het kracht-wegdiagram van dieptrekken

Bij een rotatiesymmetrisch product vervormt een segmentje uit de blenk tot een rechthoek in de zijwand. De vervorming vindt voornamelijk plaats in de flens, dus in het gedeelte dat zich tussen de plooihouder en de trekring bevindt. De vervorming bestaat hier uit radiaal rekken en tangentieel stuiken (zie figuur 4.52). De grote optredende stuik (dus $\varepsilon_{W2}<0$) wordt veroorzaakt door een tangentiële drukspanning. De plooihouder voorkomt het uitknikken (**plooien**) van de flens. In de zijwand werken zowel in axiale als in tangentiële richting trekspanningen. Hier vindt minder vervorming plaats. Het verloop van de trekkracht als functie van de verplaatsing van het trekstempel, het **kracht-wegdiagram** (zie paragraaf 4.6), hebben we in figuur 4.53 weergegeven.

De grensvervormingskromme (zie figuur 2.13) laat zien dat bij dieptrekken betrekkelijk hoge waarden van ε_{W1} mogelijk zijn.

Hoewel de wanddikte gemiddeld gezien constant is, blijkt er van plaats tot plaats verschil in wanddikte



Figuur 4.54 Scheur- en plooivorming bij een diepgetrokken bochtstuk (RVS-plaat 0,5 mm dik, circa 950×550×145 mm)

op te treden. De dikte van de bodem komt goed overeen met die van het uitgangsmateriaal. In de zijwand vlak bij de bodem treedt door de werkzame trekspanningen een verdunning (van maximaal 20%) op en aan de bovenkant is een diktetoename te constateren (van maximaal 30%) als gevolg van de stuik bij de diameterreductie onder de plooihouder.

De in te stellen **plooihouderkracht** wordt op twee wijzen begrensd. Bij een te lage waarde zullen de tangentiële drukspanningen in het materiaal van de flens, die naar binnen getrokken wordt, toch plooivorming veroorzaken. Bij een te hoge waarde kan het materiaal niet meer van onder de plooihouder de trekspleet worden ingetrokken, omdat er te veel wrijving optreedt. Hierdoor scheurt de reeds gevormde productwand doorgaans onderin. Figuur 4.54 laat een gescheurd bochtstuk met plooien zien.

De grootte van de in te stellen plooihouderkracht F_{pl} is afhankelijk van de rekgrens R_e en de treksterkte R_m van het plaatmateriaal, en van het contactoppervlak A_{pl} tussen de plooihouder en de blenk. In formulevorm geldt:

$$F_{pl} = c_{pl} \times A_{pl} \times \left(R_e + R_m\right)$$

De waarde van de constante c_{pl} varieert tussen 0,007 en 0,01, afhankelijk van de trekverhouding d_0/d_1, de plaatdikte s_0 en stempeldiameter d_1.

De **dieptrekkracht** F_d, die door het stempel moet worden uitgeoefend, is met behulp van de treksterkte R_m, de geometrie van de blenk (d_0, s_0) en met de stempeldiameter d_1 als volgt te bepalen:

$$F_d = d_1 \times \pi \times s_0 \times R_m \times \left(\frac{d_0}{d_1} - 0{,}7\right)$$

Dieptrekken zonder plooihouder kan worden uitgevoerd indien het plaatmateriaal dik genoeg is om plooivorming te voorkomen. Dat wil zeggen, wanneer er voor de blenkdiameter d_0, de trekstempeldiameter d_1 en de plaatdikte s_0 geldt:

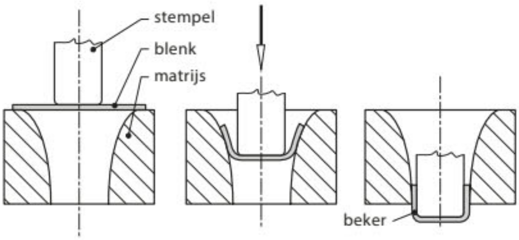
$$s_0 > \frac{1}{5} \times (d_0 - d_1)$$

In dit geval is een speciaal ontworpen matrijs nodig (zie figuur 4.55).

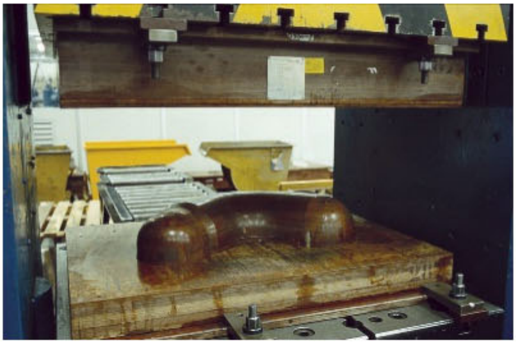
De **trekverhouding** β is gedefinieerd als de verhouding tussen de blenkdiameter en de diameter van het trekstempel. Onder de **grenstrekverhouding** β_{max} verstaat men het quotiënt van de grootst mogelijke blenkdiameter ($d_{0,max}$) en de diameter van het trekstempel waarmee in één trekbewerking nog een goed product getrokken kan worden.

$$\beta = \frac{d_0}{d_1}, \quad \beta_{max} = \frac{d_{0,max}}{d_1}$$

Wanneer de gewenste totale trekverhouding groter is dan de grenstrekverhouding β_{max}, zal het product in meerdere trekken vervaardigd moeten worden. Bij elke volgtrek dient men een steeds kleinere trekverhouding te nemen.
De grenstrekverhouding wordt primair bepaald door de verstevigingsexponent en de normaalanisotropie van het materiaal. Voor staal ligt deze verhouding meestal tussen $1{,}5 \leq \beta_{max} \leq 2{,}2$.
De dieptrekbaarheid neemt toe met de waarde van de normaalanisotropie R_n.
Ook de geometrie van het trekgereedschap speelt een wezenlijke rol. Bij een te kleine afrondingsradius aan het stempel of de trekring zal de bodem losscheuren voordat de zijwand gevormd is. Te grote afrondingsstralen brengen het gevaar van plooivorming met zich mee.



Figuur 4.55 Dieptrekken zonder plooihouder



Figuur 4.56 Houten dieptrekstempel voor een bochtstuk

De trekspleet tussen het trekstempel en de trekring moet iets groter zijn dan de oorspronkelijke plaatdikte, zodat de (ongewenste) diktetoename onder de plooihouder redelijk kan worden opgevangen. De trekspleet is meestal circa 10% groter dan de plaatdikte. Dieptrekgereedschap wordt gewoonlijk van gereedschapsstaal of gietijzer vervaardigd, maar soms ook van andere materialen, zoals hardmetaal. Vaak worden de trekranden tegen slijtage hardverchroomd. Voor vliegtuigonderdelen worden vaak stempels van geperst hout (met kunsthars bindmiddel) gebruikt (zie figuur 4.56).

Ter illustratie volgt hier een rekenvoorbeeld voor het dieptrekken van een bekervormig werkstuk.

Je beschikt over de volgende gegevens:
- Blenkdiameter $d_0 = 150$ mm
- Trekstempeldiameter $d_1 = 80$ mm
- Plaatdikte $s_0 = 2$ mm
- Radius van de matrijs $r_m = 4$ mm
- Grenstrekverhouding $\beta_{max} = 2{,}0$
- Treksterkte van het werkstukmateriaal $R_m = 400$ MPa
- Rekgrens van het werkstukmateriaal $R_e = 180$ MPa
- Constante voor de plooihouderkracht $c_{pl} = 0{,}015$

Beantwoord de volgende vragen:
a Ga na of dit werkstuk in één trek getrokken kan worden.
b Bereken de dieptrekkracht F_d.
c Bereken de plooihouderkracht F_{pl}.

Oplossing:

a Trekverhouding: $\beta = \frac{d_0}{d_1} = \frac{150}{80} = 1{,}875 < \beta_{max} = 2{,}0$

Het werkstuk is dus in één trek te trekken.

b Dieptrekkracht:

$$F_d = \pi \cdot 80 \cdot 2 \cdot 400 \cdot (\frac{150}{80} - 0{,}7) = 236250 \text{ N} = 236{,}25 \text{ kN}$$

c Plooihouderkracht:

Trekspleet = $1{,}1 \cdot s_0$ (plaatdikte + 10%)

$$A_{pl} = \frac{\pi}{4} \cdot \{d_0^2 - (d_1 + 2 \cdot 1{,}1 \cdot s_0 + 2 \cdot r_m)^2\}$$

$$= \frac{\pi}{4} \cdot \{150^2 - (80 + 2{,}2 \cdot 2 + 2 \cdot 4)^2\}$$

$$A_{pl} = 10970 \text{ mm}^2$$

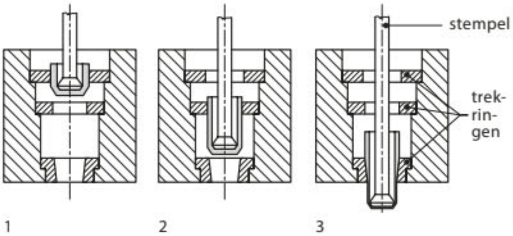
$$F_{pl} = 0{,}015 \cdot 10970 \cdot (180 + 400) = 95400 \text{ N} = 95{,}40 \text{ kN}$$

Door smering worden de wrijving en de benodigde dieptrekkracht verlaagd. Hierdoor slijten de gereedschappen minder. Wel zal de smering van het stempel tot een minimum beperkt moeten blijven als er een grote trekverhouding moet kunnen worden gehaald. Dit omdat de wrijving de trekspanningen in het product juist vermindert.

Producten van staal, koper, magnesium, aluminium en hun legeringen kunnen worden diepgetrokken. De staalindustrie heeft speciaal **dieptrekstaal** ontwikkeld met gunstige anisotropiewaarden en een hoge oppervlaktekwaliteit.

Cilindrische werkstukken met een diameter van circa 0,75 m, een hoogte van 0,5 m en een plaatdikte van 1,5 mm worden in één trek vervaardigd; relatief ondiepe carrosserieonderdelen worden zelfs diepgetrokken in afmetingen tot 3,5 × 2 m.

Duntrekken is een volgtrekbewerking waarbij de binnendiameter van het getrokken product onveranderd blijft en de wanddikte gereduceerd wordt, zodat de hoogte toeneemt (zie figuur 4.57).



Figuur 4.57 Duntrekken in drie stappen

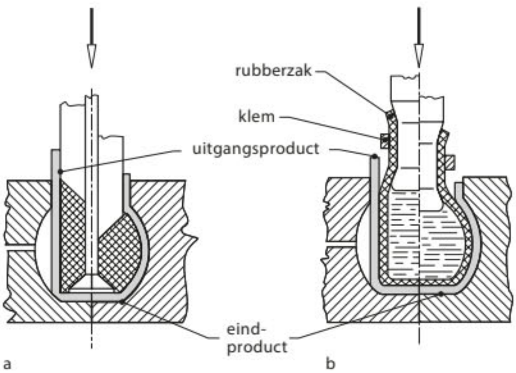
4.5.5 Krachtoverdragende media

De kosten van starre, meestal metalen gereedschappen zijn over het algemeen vrij hoog. Zeker voor complexe werkstukken en voor kleine series hebben de gereedschapskosten een grote invloed op de productiekosten van het product. Door een van beide gereedschapshelften – meestal de ondermatrijs – te vervangen door een **elastisch werkmedium** kan een aanzienlijke kostenbesparing worden bereikt.

Als elastisch werkmedium kan rubber of kunststof (polyurethaan) gebruikt worden (zie figuur 4.58a). Daarnaast worden ook met vloeistof gevulde balgen toegepast (zie figuur 4.58b). Deze elastische gereedschappen passen zich goed aan het veranderende werkstukoppervlak aan en beschadigen dit niet. Ze zorgen voor een min of meer constante vlaktedruk op het werkstuk, waardoor complexe vormen goed en relatief goedkoop geperst kunnen worden. Nadelen van deze gereedschappen zijn de extra hoge benodigde drukkrachten en de beperkte nauwkeurigheid.

Het plaatonderdeel in figuur 4.59 is met behulp van een rubberen matrijs en een houten stempel geperst. Dit wordt **rubberpersen** genoemd. Het bochtstuk in figuur 4.60 is door **hydroformen** vervaardigd. Bij dit proces wordt de blenk eerst ingeklemd. Vervolgens wordt de blenk, via een rubberen membraan, door middel van olie onder hoge druk over een stalen stempel in de gewenste vorm geperst.

De voor het omvormen benodigde energie kan worden ontleend aan een elektromotor, maar ook aan een andere energiebron. Bij **explosief omvor-**

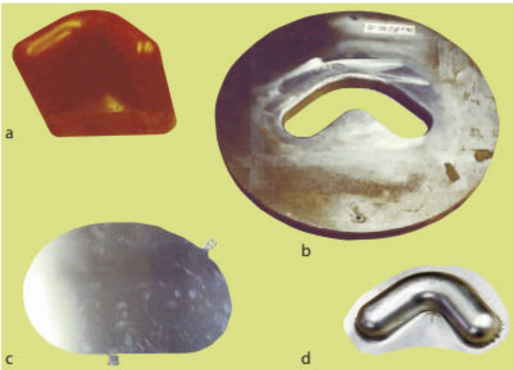


Figuur 4.58 Krachtoverdragende media: rubber (a) en vloeistof met rubberzak (b)

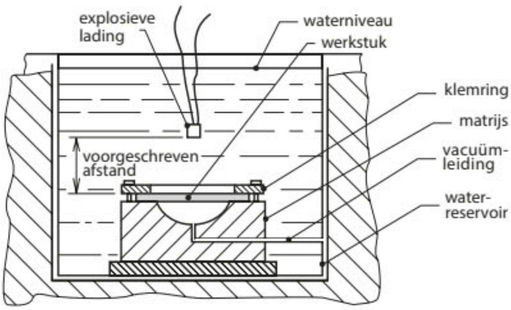
men (zie figuur 4.61) wordt door de kracht van een onderwaterexplosie een schokgolf opgewekt. De druk hiervan is in staat het werkstukmateriaal om te vormen.



Figuur 4.59 Rubberpersen: stempel en geperst product (Phoenix 3D Metaal)



Figuur 4.60 Hydroform product van Al-plaat, 0,6 mm dik, circa 250 × 150 mm (d), met uitgangsblenk (c), stempel (a) en plooihouder (b)



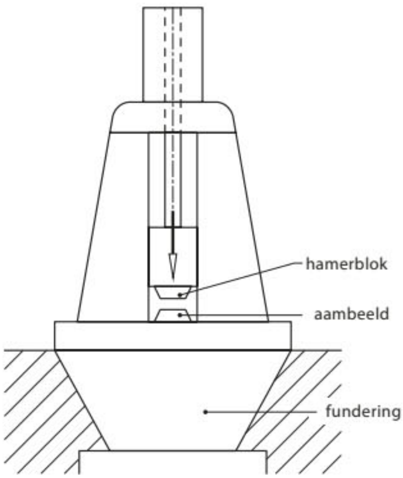
Figuur 4.61 Explosief omvormen

4.6 Machines

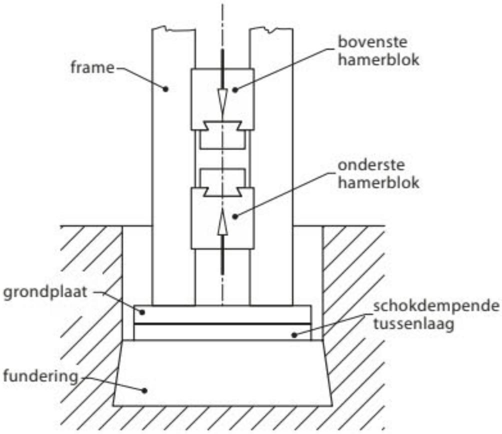
Er zijn veel verschillende typen machines voor omvormbewerkingen in gebruik. Deze machines kennen grote verschillen in **kracht-wegdiagram** en snelheid. Een kracht-wegdiagram van een machine geeft weer welke kracht in ieder punt van de werkzame **slag** beschikbaar is.

Globaal gezien kunnen we onderscheid maken tussen persen en hamers. De persen kunnen we op basis van hun kracht-wegdiagram verder onderverdelen in krachtgebonden, weggebonden en arbeids- of energiegebonden gereedschapswerktuigen. **Hamers** zijn uiteraard energiegebonden machines. Ze zijn bijzonder geschikt voor smeedbewerkingen vanwege de geringe contacttijd tussen het gereedschap en het warme werkstukmateriaal, dat hierdoor minimaal afkoelt.
Bij de conventionele **valhamer** (zie figuur 4.62) wordt de potentiële energie van het hamerblok tijdens de valbeweging in kinetische energie omgezet. Deze energie wordt vervolgens (voor het grootste gedeelte) gebruikt voor de deformatie van het werkstuk. Door een grotere massa van het hamerblok of een grotere valhoogte kan de geleverde energie worden vergroot. Naast de valenergie kan ook een andere energiebron gebruikt worden om het hamerblok te versnellen (persluchthamer, stoomhamer, hydraulische hamer).

Een nadeel van de genoemde hamers is de grote restimpuls op de fundatie van de machine, waar-



Figuur 4.62 De valhamer



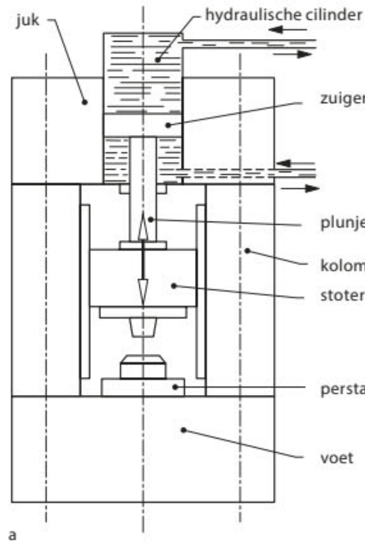
Figuur 4.63 De tegenslaghamer

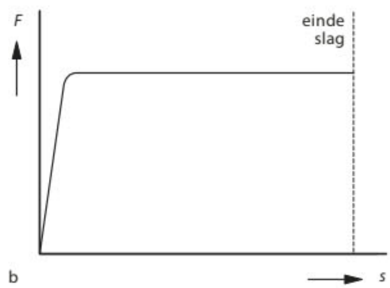
door sterke trillingen en geluidsoverlast optreden. Bij een **tegenslaghamer** (zie figuur 4.63) wordt de impuls van de hamer gecompenseerd door het aambeeld (met het werkstuk) een beweging te geven die tegengesteld is aan de hamer.

Persen zijn werktuigen waarbij de stoter een op- en neergaande beweging uitvoert ten opzichte van een vaste tafel. Tafel en stoter zijn de dragers van het onder- en bovengereedschap, die de vorminformatie van het te vervaardigen werkstuk bevatten. Binnen het persframe is een gesloten krachtcircuit, waardoor het persframe tijdens het persen krachten opneemt en elastisch vervormt. Bij het instellen van de slaglengte moet hier rekening mee gehouden worden.
Op basis van de indeling in krachtgebonden, weggebonden en arbeids- of energiegebonden persen bespreken we hier achtereenvolgens de hydraulische pers, de krukpers, de excenterpers, de kniehefboompers en de schroefslagpers.

De krachtgebonden pers

De stoter van een **hydraulische pers** (zie figuur 4.64) wordt aangedreven door in een cilinder oliedruk op een zuiger te laten werken. Omdat de oliedruk een gegeven maximale waarde niet kan overschrijden, is de perskracht begrensd. De pers is dus krachtgebonden, zoals ook uit het kracht-wegdiagram blijkt. Hydraulische persen hebben doorgaans een lagere productiesnelheid dan mechanische persen, maar zijn in het bijzonder geschikt voor processen waarbij een aanzienlijke kracht over een relatief lange slag geleverd moet worden, zoals bij dieptrekken.



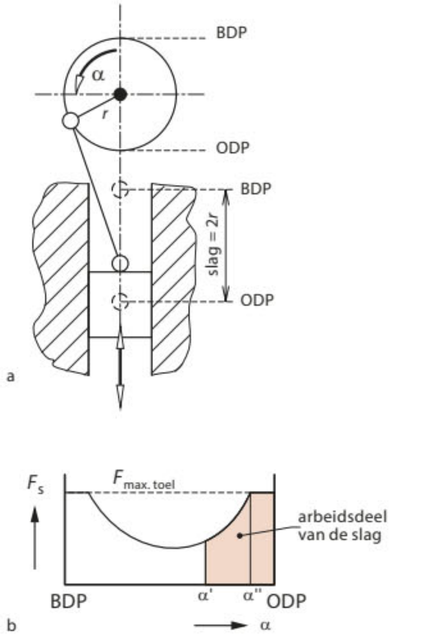


Figuur 4.64 De hydraulische pers (a) met kracht-wegdiagram (b)

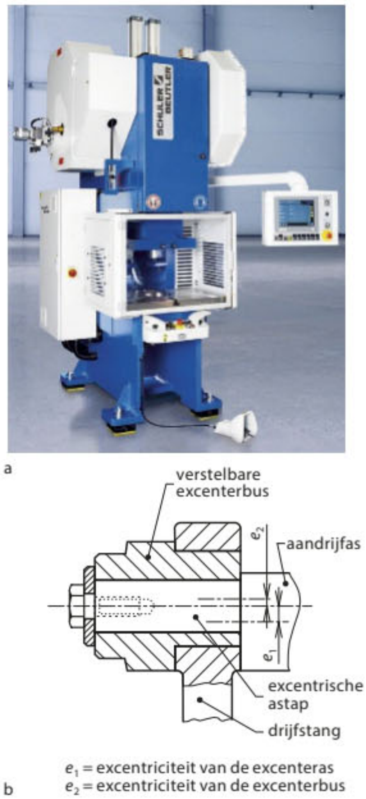
De weggebonden pers

Een **krukpers** wordt aangedreven door middel van een kruk-drijfstangmechanisme met een vaste slag (zie figuur 4.65). Bij een eenparige beweging van de krukas is het snelheidsverloop van de stoter bij benadering sinusvormig en keert de beweging in het onderste dode punt (ODP) om; de pers is dus weggebonden. In figuur 4.65 is ook het kracht-wegdiagram weergegeven. Bij een grote krukhoek α, dicht voor het ODP (tussen α'' en het ODP in figuur 4.65b), wordt de F_{max}-lijn bepaald door de sterkte van de drijfstang en het frame. Bij kleinere krukhoeken ($\alpha' < \alpha < \alpha''$) bepaalt de sterkte van de krukas de toelaatbare perskracht.

Mechanische persen zijn in het algemeen sneller en beter te automatiseren dan hydraulische persen, en in het bijzonder geschikt wanneer de maximale



Figuur 4.65 Kruk-drijfstangmechanisme (a) met kracht-wegdiagram (b) voor de maximum toelaatbare kracht F_{max}

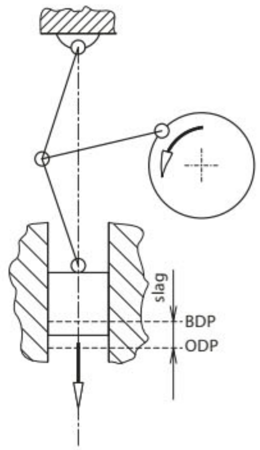


Figuur 4.66 Excenterpers (Schuler) (a) en het principe van de slagverstelling (b)

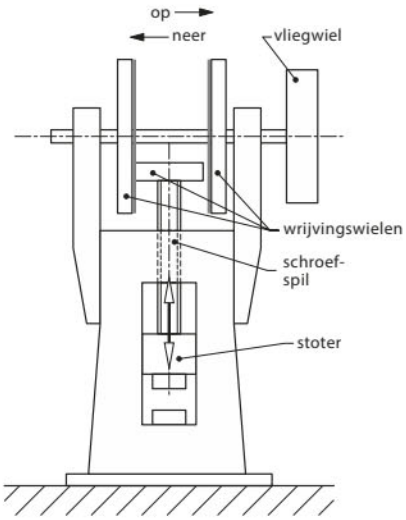
kracht slechts over een relatief korte slag geleverd dient te worden, zoals bij pons- en stansbewerkingen (zie paragraaf 7.1.4).
Andere weggebonden persen zijn de **excenterpers** (zie figuur 4.66), die wel een verstelbare slag heeft, en de **kniehefboompers**, een pers die aangedreven wordt door een kniehefboommechanisme (zie figuur 4.67). De kniehefboompers wordt dikwijls voor precisiesmeden gebruikt. De slaglengte van de excenterpers kan versteld worden door de excenterbus te ontgrendelen en te verdraaien ten opzichte van de tap van de excenteras (zie figuur 4.66b).

De arbeidsgebonden pers

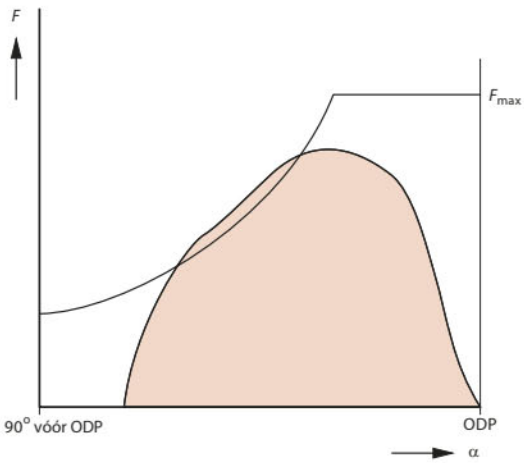
Bij een **schroefslagpers** (zie figuur 4.68) beweegt de stoter zich omlaag totdat alle energie van het wrijvingswiel op de schroefspindel is verbruikt. De schroefspindel met wrijvingswiel fungeert hierbij in feite als vliegwiel. De arbeid wordt hierbij grotendeels door het werkstuk opgenomen als omvormarbeid; de rest wordt in de vorm van elastische energie in het gereedschap en de machine opgenomen en komt bij de omkering van de beweging weer vrij.



Figuur 4.67 Kniehefboommechanisme



Figuur 4.68 De schroefslagpers



Figuur 4.69 Kracht-wegdiagram van dieptrekken op een krukpers

Bij de karakterisering van persen spelen behalve de primaire eigenschappen, zoals het kracht-wegdiagram (perskarakteristiek), de nauwkeurigheid en stijfheid, ook secundaire eigenschappen als stotersnelheid, contacttijd, slagbegrenzing en productiesnelheid een rol.

4.6.1 Machinekeuze

Ieder omvormproces stelt specifieke eisen aan de te gebruiken pers. Allerlei factoren spelen hierbij een rol: de maximaal benodigde perskracht, de persenergie, de perssnelheid, de vereiste nauwkeurigheid, de inbouwruimte, de contacttijd tussen het gereedschap en het werkstuk (al dan niet van tevoren opgewarmd), de stijfheid enzovoort.

Het is van wezenlijk belang dat de machine- en de proceskarakteristiek (het kracht-wegdiagram) zo goed mogelijk op elkaar worden afgestemd. Men moet er hierbij voor zorgen dat de proceskarakteristiek geheel, dus over de gehele slag, onder de machinekarakteristiek komt te liggen.

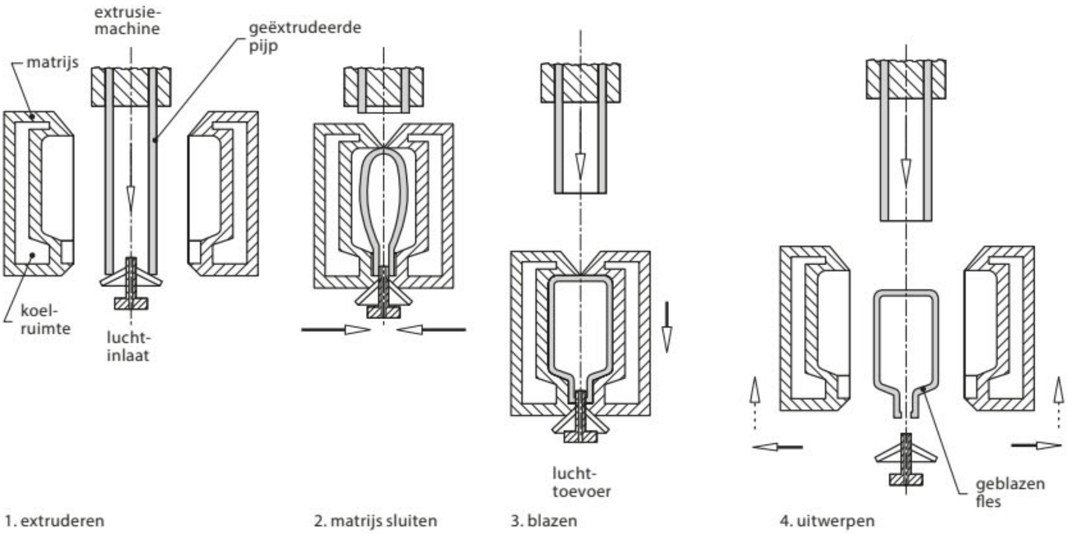
Dit illustreren we met het volgende voorbeeld. In figuur 4.69 zijn het kracht-wegdiagram van het dieptrekproces en dat van de krukpers in één grafiek weergegeven. Het feit dat de maximale dieptrekkracht hier kleiner is dan dan de maximaal toelaatbare perskracht is niet voldoende. De proceskarakteristiek snijdt immers de F_{max}-lijn van de pers. Daaruit moeten we concluderen dat de beschouwde pers overbelast zal worden en dus niet geschikt is voor de betreffende dieptrekbewerking.

4.7 Omvormen van kunststoffen

De belangrijkste vormgevingsprocessen van kunststoffen, zoals extruderen en spuitgieten, vinden plaats in de viskeuze toestand van het materiaal. We hebben ze daarom reeds behandeld in hoofdstuk 3. In dit hoofdstuk komen een aantal secundaire vormgevingstechnieken aan de orde, die in de rubbertoestand van het materiaal (zie paragraaf 2.4.3) worden uitgevoerd. Het uitgangsmateriaal is een halffabricaat, bijvoorbeeld buis of plaat, dat in een primair vormgevingsstadium is vervaardigd. We behandelen hier het blazen van flessen en folie en het thermovormen.

Extrusieblaasproces

Met het **extrusieblaasproces** worden flessen en andere holle voorwerpen direct na het extrusieproces geblazen. De nog weke buis van een thermoplastisch materiaal, die de extruder verticaal verlaat, wordt door een uit twee helften bestaande matrijs omsloten en van binnenuit met behulp van verwarmde lucht (met een druk van 350-750 kPa) tegen de gekoelde binnenwanden van een matrijs geblazen (zie figuur 4.70). Hierbij wordt de hals van de fles gekalibreerd met een doorn en wordt de



Figuur 4.70 Het extrusieblaasproces

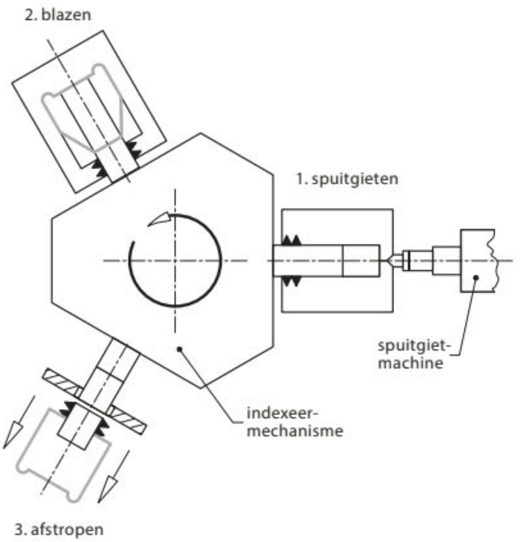
bodem dichtgelast. Bij producten met een grotere wanddikte is de afkoeltijd relatief groot en zal gewerkt worden met een matrijs die met de buis meebeweegt. Nadelen van dit proces zijn onder meer de ongelijkmatige wanddikte, de naad in de bodem en het materiaalverlies bij het afknijpen van de uiteinden.

Afhankelijk van het type kunststof is een volumevergroting tot een factor 7 mogelijk. Met dit proces worden niet alleen op grote schaal kleinere flessen geblazen, maar bijvoorbeeld ook vaten met een inhoud van 2000 liter. De meest gebruikte materialen zijn polyetheen, PVC, polyamide en polycarbonaat.
Door uit te gaan van gecoëxtrudeerde buis (zie paragraaf 3.11.2) kunnen producten geblazen worden die uit meerdere lagen bestaan. Een typisch productvoorbeeld van dit '*multilayer blow moulding*'-proces is een kunststof verpakking voor voeding of drank met een speciale laag voor smaak- en aromabescherming, een goed printbare bovenlaag enzovoort. Ook bij de productie van verpakkingen van cosmetische en farmaceutische producten wordt dit proces veel toegepast.

Spuitgietblaasproces

Een ander proces om flessen te vervaardigen is het **spuitgietblaasproces**. Hierbij wordt op een spuitgietmachine eerst een voorgevormde huls gemaakt, die zo gedimensioneerd is dat na het blazen een nagenoeg constante wanddikte ontstaat. Vervolgens wordt in nog weke toestand de voorgevormde huls (*parison*) op een volgend station met behulp van verwarmde perslucht tegen de binnenwanden van de gekoelde blaasmatrijs geblazen en afgekoeld (zie figuur 4.71). Soms worden de voorgevormde hulzen bij een speciaal spuitgietbedrijf vervaardigd en met een nog relatief klein volume naar de '*bottling companies*' getransporteerd, waar ze weer worden verwarmd tot in de rubbertoestand en tot flessen geblazen. Met het spuitgietblaasproces worden frisdrankflessen zonder naad in de bodem, kleinere containers en jerrycans vervaardigd. In vergelijking met het extrusieblaasproces zijn met het spuitgietblaasproces een grotere productnauwkeurigheid (vooral van de hals van de fles) en een hogere productiesnelheid te bereiken, met minder materiaalverlies en afkeur.

Een variant op dit proces is **stretch blow moulding**, waarbij de voorgevormde huls door verwarming in de rubbertoestand gebracht wordt. Daarna wordt het materiaal langs mechanische weg in de lengterichting verstrekt en gelijktijdig in de dwarsrichting opgeblazen. Deze twee-assige belasting bevordert de rekristallisatie van de kunststof en verbetert daarmee de sterkte en de doorzichtigheid van het eindproduct. Hoogwaardige frisdrankflessen, zoals de PET-flessen ('PET' staat voor polyetheentereftalaat), zijn in het algemeen biaxiaal verstrekt. Ook

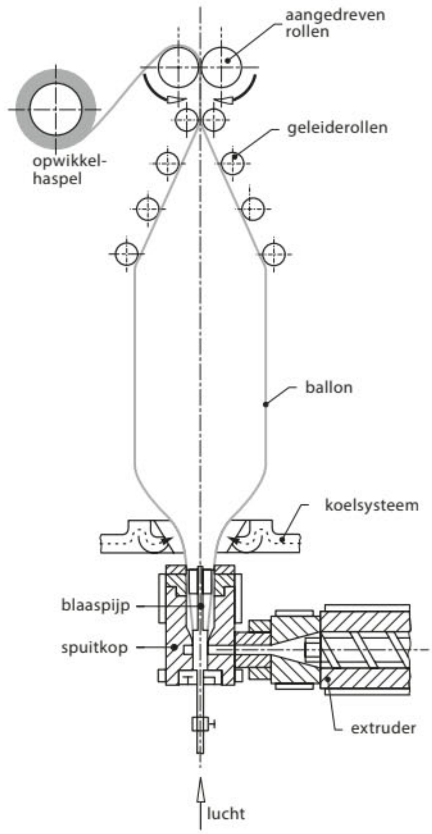


Figuur 4.71 Het spuitgietblaasproces

vierkanten en andere niet-ronde vormen zijn op deze wijze te vervaardigen.

Folieblazen

Ook **folieblazen** wordt met het extrusieproces gecombineerd. Een extruder met een verticaal geplaatste extrusieopening vervaardigt hierbij met behulp van een ringvormige matrijs een dunwandige weke buis, die door een inwendige overdruk tot een veelvoud van zijn oorspronkelijke diameter wordt opgeblazen (zie figuur 4.72). Op deze manier wordt in een continu proces buisfolie gevormd. Deze buisfolie wordt vervolgens met lucht gekoeld en daarna in de lengterichting opengesneden en opgewikkeld of door snijden en lassen direct verwerkt tot bijvoorbeeld vuilniszakken of draagtassen. Op deze wijze worden folies gemaakt met een breedte van 6 m of meer. Het uitgangsmateriaal bij folieblazen is meestal polyetheen. Van lage dichtheid polyetheen (LDPE) worden folies met een dikte tot minimaal circa 0,015 mm vervaardigd. Ook laminaatfolies, die uit meerdere lagen bestaan, kunnen met het folieblaasproces vervaardigd worden. In feite wordt hierbij het principe van coëxtrusie (zie paragraaf 3.11.2) gecombineerd met het blaasproces. De verschillende lagen van een laminaatfolie vervullen verschillende functies; denk bijvoorbeeld aan sterkte, gasdichtheid en lasbaarheid. Het is tegenwoordig niet ongebruikelijk om folies met vijf lagen te vervaardigen.

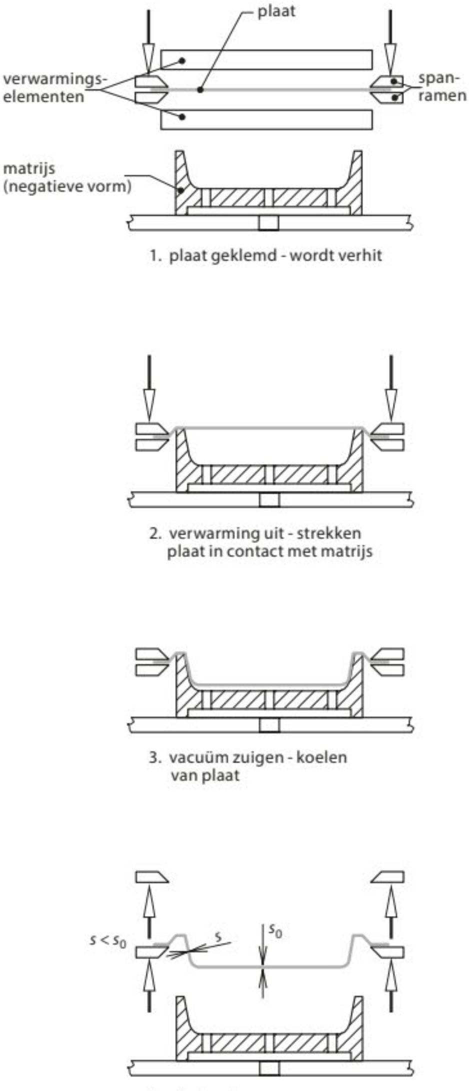


Figuur 4.72 Folieblazen

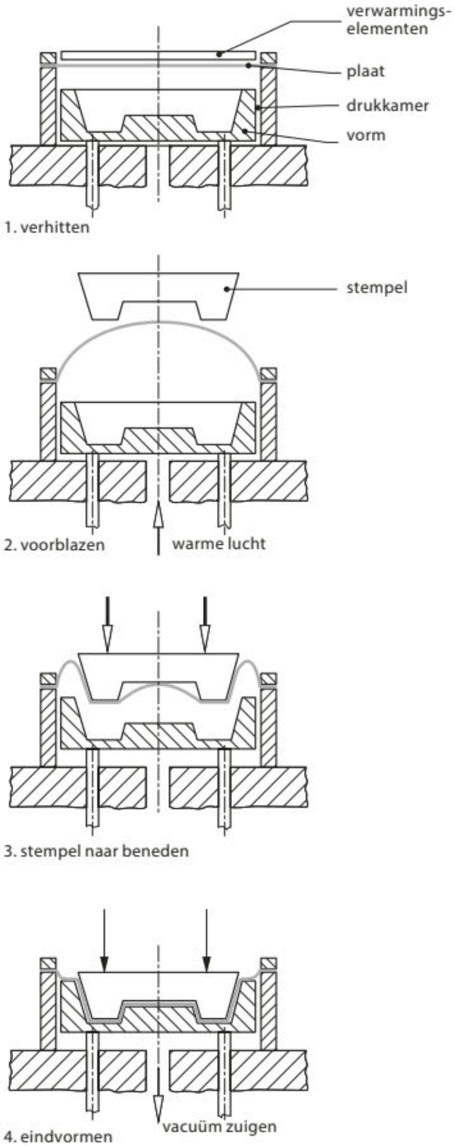
Door PET biaxiaal te verstrekken is het mogelijk om folies met dikten kleiner dan 0,001 mm (1 µm) te maken.

Thermovormen

Thermovormen is een proces waarbij men uitgaat van geëxtrudeerde plaat, en soms ook van gekalanderde plaat. Het plaatmateriaal wordt in een oven of door middel van infraroodstraling verhit tot in de rubbertoestand, in een matrijs gevormd en vervolgens weer afgekoeld met perslucht of waternevel. De meest toegepaste techniek is **vacuümvormen**, waarbij de verwarmde plaat door middel van vacuüm in een matrijs getrokken wordt en daarmee de matrijsvorm aanneemt (zie figuur 4.73). Bij grotere wanddikten, meer complexe of nauwkeuriger vormen is vacuüm dikwijls niet meer voldoende en wordt er daarnaast een overdruk van 0,1-1 MPa aan de andere zijde aangebracht ('*pressure thermoforming*'). Ook kan vacuümvormen met een persbewer-



Figuur 4.73 Vacuümvormen



Figuur 4.74 Vacuümvormen met behulp van stempel

king worden gecombineerd (‘*mechanical thermoforming*’, zie figuur 4.74). Een nieuwe ontwikkeling is ‘*twin-sheet thermoforming*’, waarmee holle voorwerpen kunnen worden gemaakt door twee verwarmde platen tegen twee tegenover elkaar geplaatste matrijshelften vacuüm te trekken, deze gelijktijdig van binnenuit met perslucht op te blazen en aan de randen op elkaar te lassen. In figuur 4.75 zie je een werkstuk dat op deze wijze is vervaardigd.

Thermovormen wordt veel toegepast voor de vervaardiging van wegwerpartikelen, zoals koffiebekertjes en verpakkingsmateriaal, maar ook voor producten met een relatief groot oppervlak, zoals lichtbakken, aanrechtbladen en panelen van douchecabines. Dit soort artikelen is minder geschikt om te spuitgieten vanwege de ongunstige vloeiwegverhouding en de relatief grote sluitkrachten. Bovendien zijn de matrijzen voor vacuümvormen aanzienlijk eenvoudiger en beduidend goedkoper



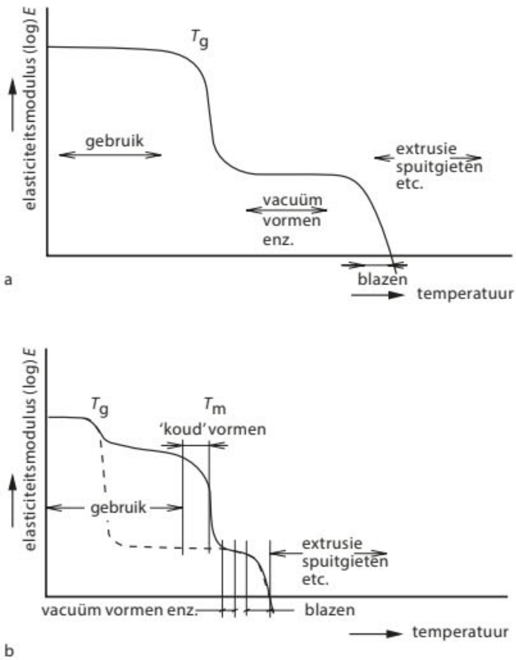
Figuur 4.75 Vloeistoftank vervaardigd door twin-sheet thermoforming (Opido)

dan spuitgietmatrijzen. In verband met de relatief lage krachten worden de matrijzen voor vacuümvormen namelijk vervaardigd van aluminium of epoxyhars. De cyclustijd is bij thermovormen echter langer dan bij spuitgieten. Een ander nadeel van thermovormen is de ongelijkmatige wanddikte van het werkstuk. Verder moet men rekening houden met het feit dat bij de vorming en snelle afkoeling van het product de ketenoriëntaties van de rubbertoestand in feite worden ingevroren. Dit heeft als gevolg dat het materiaal terugveert naar de oorspronkelijke plaatvorm bij verwarming van het product boven de glas-rubberovergang. Ook bij verwarming tot ruim onder de glas-rubberovergang is er overigens duidelijk sprake van een neiging tot volumetoename.

Bij het thermovormen mag het materiaal tijdens verwarming niet in de viskeuze toestand komen; de plaat zou dan in de opwarmfase al te veel doorzakken. Dit betekent dat amorfe polymeren, waaronder PVC, PS, PMMA en ABS, beduidend beter geschikt zijn voor dit proces dan kristallijne polymeren. Amorfe polymeren hebben immers een aanzienlijk groter rubberachtig gebied dan kristallijne polymeren, zoals ook uit figuur 2.24 blijkt. Bij het kristallijne PE en PP is vacuümvormen nog mogelijk als de verwerkingscondities binnen zeer nauwe toleranties gehouden worden, bij PA niet.
Producten uit PP worden ook vervaardigd door de plaat tot net onder de glas-rubberovergangstemperatuur te verhitten. De stijfheid van het materiaal is dan al aanzienlijk verminderd. Vervolgens kan de gewenste vorm met een persstempel in de ingeklemde plaat worden aangebracht.

Omvormen op kamertemperatuur

Diverse kunststoffen, waaronder PP, ABS en PVC, kunnen ook goed in de glastoestand omgevormd worden. De toegepaste processen, zoals walsen,



Figuur 4.76 Temperatuurgebieden waarin vormgevingsprocessen van amorfe (a) en kristallijne (b) thermoplasten plaatsvinden

buigen, dieptrekken en koudpersen, wijken hierbij niet wezenlijk af van die voor metaalbewerking. Met koudpersen worden werkstukken als tandwielen, snaarschijven en pompwaaiers gemaakt.

In figuur 4.76 geven we een overzicht van de temperatuurgebieden waarin de diverse vormgevingsprocessen van thermoplasten plaatsvinden.

Samenvatting

Bij omvormtechnieken behoudt het uitgangsmateriaal zijn samenhang. We maken onderscheid tussen massief omvormen en het omvormen van plaat.

Tot massief omvormen, waarbij van massief uitgangsmateriaal wordt uitgegaan, behoren de processen walsen, extruderen, trekken en smeden. Bij massief omvormen zijn, onder invloed van voornamelijk drukspanningen, zeer grote vervormingen in alle richtingen te bereiken. Deze processen worden zowel toegepast voor het maken van halffabricaten, zoals plaat, staf en profiel, als voor het maken van onderdelen, zoals smeedstukken.

Omvormprocessen van plaat zijn buigen, strekbuigen, forceren, vloeidraaien en dieptrekken. Bij het omvormen van plaat spelen de vormveranderingen zich voornamelijk in het vlak van de plaat af. Het draait hierbij om rekspanningen of combinaties van trek- en drukspanningen. Plaatomvormen wordt in hoofdzaak bij het fabriceren van onderdelen gebruikt.

Vaak moeten de omgevormde producten nog een warmtebehandeling ondergaan, gevolgd door één of meer afnemende bewerkingen, om de juiste mechanische eigenschappen, de vereiste maat- en vormtoleranties en oppervlaktekwaliteit te realiseren.

Bij de keuze van de machine moeten de machine- en de proceskarakteristieken op elkaar worden afgestemd. Het is essentieel dat het kracht-wegdiagram van het omvormproces in zijn geheel onder de machinekarakteristiek ligt.

Het omvormen van kunststoffen op kamertemperatuur, in de glastoestand, gebeurt analoog aan het omvormen van metalen. Blaas- en thermovormprocessen vinden in het rubbergebied van het materiaal plaats. Het uitgangsmateriaal is een halffabricaat, dat door middel van extrusie of spuitgieten (dus in het viskeuze gebied) is vervaardigd.

Literatuur

4.1 Kalpakjian S., Schmid S.R., *Manufacturing Engineering and Technology*, 7th SI edition, Pearson, 2014, ISBN 978-981-06-9406-7. Hoofdstuk 13 'Metal-rolling processes and equipment'; hoofdstuk 14 'Metal-forging processes and equipment'; hoofdstuk 15 'Metal extrusion and drawing processes and equipment'; hoofdstuk 16 'Sheet-metal forming processes and equipment'; hoofdstuk 19 'Plastics and composite materials: Forming and shaping'.

4.2 Groover M.P., *Principles of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems*, 5th SI edition, Wiley., 2013, ISBN 978-1-118-47420-4. Hoofdstuk 14 'Fundamentals of metal forming'; hoofdstuk 15 'Bulk deformation processes in metalworking'; hoofdstuk 16 'Sheet metalworking'; hoofdstuk 10 'Shaping processes for plastics'.

4.3 Hosford F.H., Caddell R.M., *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*, 4th edition, Cambridge University Press, 2014, ISBN 978-1-107-67096-9.

4.4 Doege E., Behrens B.-A., *Handbuch Umformtechnik*, 2nd edition, Springer Verlag, 2010, ISBN 978- 3-642-04248-5.

4.5 Vegt A.K. van der, Govaert L.E., *Polymeren: van keten tot kunststof*, VSSD Delft, 2005, ISBN 978-90-71301-48-3.

4.6 Young R.J., Lovell P.A., *Introduction to Polymers*, 3rd edition, CRC Press, 2011, ISBN 978-0-84-933929-5.

Symbolenlijst

Indices:

max	=	maximaal toelaatbaar
0	=	oorspronkelijk(e grootheid)
1	=	na het omvormen (na de eerste stap), mits andere betekenis in de symbolenlijst apart vermeld
1,2,3	=	in (hoofd)richting 1, 2 respectievelijk 3

Symbolen:

a	=	Constante in formule voor $F_{extr\text{-}k}$	[-]
A	=	Doorsnede-oppervlak	[mm^2]
A_{pl}	=	Contactoppervlak tussen plooihouder en blenk	[mm^2]
b	=	(plaat)Breedte	[mm]
c_a	=	Constante voor de ligging van de neutrale laag bij buigen	[-]
c_b	=	Constante in formule voor F_b	[-]
c_{extr}	=	Extrusieconstante in formule voor $F_{extr\text{-}w}$	[MPa]
c_{pl}	=	Constante in formule voor F_{pl}	[-]
C	=	Karakteristieke spanning	[MPa]
d	=	Diameter	[mm]
d_1	=	Diameter van het dieptrekstempel	[mm]
E	=	Elasticiteitsmodulus	[MPa]
F_b	=	Buigkracht	[N]
F_d	=	Dieptrekkracht	[N]
$F_{extr\text{-}k}$	=	Kracht voor koudextrusie	[N]
$F_{extr\text{-}w}$	=	Kracht voor warmextrusie	[N]
F_n	=	Normaalkracht	[N]
F_{pl}	=	Plooihouderkracht	[N]
F_{stuik}	=	Kracht, nodig voor stuiken	[N]
F_t	=	Tangentiële kracht	[N]
h	=	Hoogte	[mm]
H	=	Materiaalhardheid	[HV]
k_w	=	Omvormweerstand	[MPa]
l	=	Lengte	[mm]
m	=	Constante in formule voor $F_{extr\text{-}k}$	[-]
n	=	Verstevigingsexponent	[-]
r	=	Straal	[mm]
r_b	=	Buigradius	[mm]
R_e	=	Rekgrens	[MPa]
R_m	=	Treksterkte	[MPa]
R_n	=	Normaalanisotropie	[-]
R_p	=	Planaire anisotropie	[-]
R_α	=	Anisotropiefactor	[-]
s	=	Plaatdikte	[mm]
T	=	Temperatuur	[°C]
T_{sm}	=	Smelttemperatuur	[K]
v	=	Snelheid	[m/s]
V	=	Volume	[mm^3]
w	=	Breedte van de buigopening	[mm]
α	=	Meeneemhoek (bij walsen)	[°]
		Krukhoek (bij een krukpers)	[°]
α_b	=	Buighoek	[°]
α_t	=	Terugveerhoek	[°]
α_{res}	=	Resulterende hoek (bij buigen)	[°]
β	=	Trekverhouding	[-]
ε	=	Maatrek	[-]
ε_w	=	Ware of natuurlijke rek	[-]
η_k	=	Omvormrendement	[-]
μ	=	Wrijvingscoëfficiënt	[-]
σ	=	Ware spanning	[MPa]
σ_v	=	Vloeispanning	[MPa]
$\bar{\sigma}$	=	Effectieve spanning	[MPa]

Oefenvragen

4.1 Noem enkele voordelen van koudomvormen, halfwarmomvormen en warmomvormen. Vergelijk daarbij deze processen met elkaar.

4.2 Noem twee omvormprocessen waarmee metalen bekervormige producten vervaardigd kunnen worden. Vergelijk deze vormgevingsmethoden op het gebied van de uitvoering, procesbegrenzingen en toepassingen.

4.3 Noem twee processen die principieel niet in het warmomvormgebied kunnen worden uitgevoerd.

4.4 Noem twee omvormprocessen waarbij wrijving absoluut noodzakelijk is voor de uitvoering van het proces.

4.5 Procesbegrenzingen beperken de mogelijkheden van omvormprocessen. Wat zijn de procesbegrenzingen bij buigen, draadtrekken en dieptrekken? Verklaar voor alle drie de processen op welke wijze het proces wordt begrensd.

4.6 Bij omvormprocessen onder invloed van een drukbelasting, zoals smeden en extruderen, zal plastische instabiliteit geen procesbegrenzing vormen. Toon dat aan. Betekent dit dat er met drukprocessen enorme vormveranderingen mogelijk zijn, of zullen er andere begrenzingen optreden? Licht je antwoord toe.

4.7 Bij de kwaliteitsafdeling van een dieptrekbedrijf komen afgekeurde producten binnen. De afgekeurde producten hebben een te sterke oorvorming, een te sterke plooivorming of scheuren in de bodem. Wat is de oorzaak van elk van deze defecten en hoe zijn deze te voorkomen?

4.8 Maak een vergelijking tussen het extruderen van aluminium en het extruderen van thermoplasten. Noem vier overeenkomsten en vier verschillen.

4.9 Bij de keuze van een pers voor een omvormbewerking zal deze op het krachtwegdiagram van het proces moeten worden afgestemd. Licht toe hoe dit gedaan wordt bij een hydraulische pers, een krukpers en een schroefslagpers. Wat gebeurt er bij overbelasting?

4.10 Bij het extrusieblaasproces zijn tijdens het opblazen van het geëxtrudeerde thermoplastische materiaal de procesparameters temperatuur en vervormingssnelheid van wezenlijk belang.
Geef globaal weer hoe de instelling van het proces wordt begrensd en verklaar op welke wijze dit gebeurt. Doe dit door een grafiek te tekenen waarin de temperatuur van de smelt (de 'plastische' kunststof) als functie van de vervormingssnelheid is uitgezet.
Licht bij iedere begrenzingslijn kort toe wat er fout gaat als de begrenzingslijn overschreden wordt en wat de oorzaak hiervan is.

inclusief website!

Op www.industrieleproductie.nl vind je de antwoorden op deze vragen, maar ook extra studie- en oefenmateriaal, zoals video's en meer opgaven.

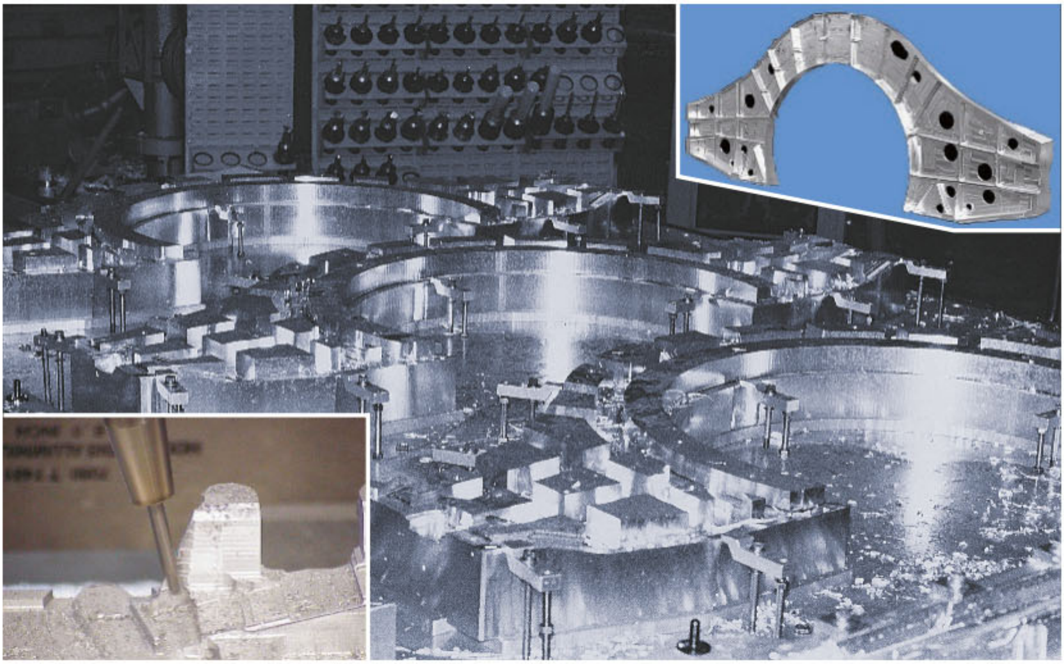
5 Verspanen

In dit hoofdstuk behandelen we het principe van de mechanisch afnemende bewerkingen, of kortweg de verspanende bewerkingen.
We beschrijven de verschillende verspanende bewerkingen, hun mogelijkheden en begrenzingen en de benodigde gereedschappen en machines.
We leggen in dit hoofdstuk de nadruk op het bewerken van metalen; de bijzondere aspecten van het verspanen van niet-metallische materialen zoals kunststoffen vatten we kort samen in een afsluitende paragraaf.

5.1 Inleiding

Bij het verspanen wordt materiaal afgenomen in de vorm van **spanen**, die vervolgens worden afgevoerd. Het spaanmateriaal kan alleen via 'recycling' door de materiaalfabrikant weer bruikbaar gemaakt worden. Bovendien wordt bij het verspanen vrij veel energie verbruikt. Bij sommige producten, vooral vliegtuigonderdelen, wordt 90-95% van het uitgangsmateriaal verwijderd (zie figuur 5.1). Bij nauwkeurige '*near netshape*'-producten zoals smeed- of gietstukken en bij producten gemaakt door middel van materiaalaangroeitechnieken (*additive manufacturing*, zie hoofdstuk 8), bedraagt het te verwijderen materiaal meestal minder dan 5%.
Een bijkomend nadeel van verspanen is de vervuiling van werkplaatsen en machines. Men gebruikt koelmiddelen, vooral om de gereedschappen te beschermen. Deze veroorzaken milieuproblemen, waarvoor goede oplossingen gezocht worden. Een deeloplossing heeft men gevonden in de vorm van minimaalsmering.

Bij het oervormen en omvormen wordt een vooraf in het gereedschap aangebrachte vorm overgedragen op het product (zie hoofdstuk 3 en 4). Bij de



Figuur 5.1 Vliegtuigonderdeel tijdens en na verspanende bewerking

verspanende bewerkingen **genereert** het gereedschap door middel van een relatieve beweging ten opzichte van het werkstuk voor elk te maken product opnieuw de gewenste vorm. Deze beweging wordt de **gereedschapsbaan** genoemd.

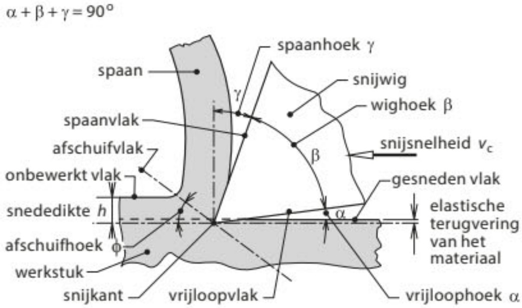
Afnemende bewerkingen zijn dus in sommige opzichten weinig efficiënte processen, maar vaak zijn ze onmisbaar. Voordat de ontwerper besluit ze toe te passen, moet hij zich afvragen of dit onvermijdelijk is. Redenen voor toepassing kunnen zijn:
- de vorm van het product;
- de vereiste nauwkeurigheid;
- de oppervlaktegesteldheid;
- de vereiste materiaaleigenschappen;
- te hoge kosten van uitvoering of inrichting van andere bewerkingen, bijvoorbeeld door het te lage productaantal;
- de lange levertijd van bijvoorbeeld een smeedmatrijs.

In het algemeen kiest men bij grote productaantallen niet voor verspanende bewerkingsmethoden. Dit neemt niet weg dat de afnemende bewerkingen in de metaalindustrie een groot aandeel hebben in de toegevoegde waarde van het product.

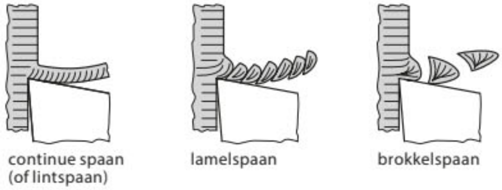
5.2 Het principe van verspanende bewerkingen

Overtollig materiaal wordt verwijderd door een **snijwig** (zie figuur 5.2). Voor het verwijderen van metaal zijn betrekkelijk grote krachten nodig. Om breuk van de snijwig te voorkomen moet de **wighoek** β groot zijn, soms zelfs groter dan 90°. Het materiaal van het werkstuk ondergaat onder invloed van de uitgeoefende krachten een kleine elastische vervorming en veert na het passeren van de **snijkant** weer terug. Om wrijving tussen het werkstukoppervlak en het **vrijloopvlak** van de snijwig te beperken is een **vrijloophoek** α van circa 6° nodig. De **spaanhoek** γ is de hoek tussen het **spaanvlak** en het vlak loodrecht op de bewegingsrichting van de snijwig. Deze hoek is klein; een grote waarde van β kan zelfs resulteren in een negatieve spaanhoek. Gewoonlijk ligt de spaanhoek tussen +30° en –10°.

De kracht die de snijwig uitoefent op het werkstukmateriaal veroorzaakt drukspanningen loodrecht op het spaanvlak. Dit leidt tot schuifspanningen in een vrij smalle zone (de afschuifzone), en vervolgens



Figuur 5.2 De snijwig



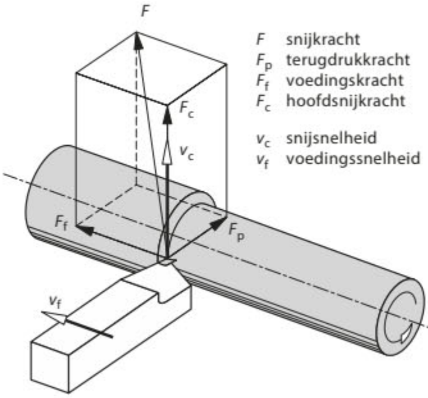
Figuur 5.3 Verschillende soorten spanen

tot afschuiving. In figuur 5.2 hebben we deze zone schematisch weergegeven door het afschuifvlak, aangegeven door de afschuifhoek ϕ. Je kunt je de afschuifzone voorstellen als dunne schijfjes materiaal die over elkaar heen schuiven en op deze wijze de spaan vormen. Dit is een quasistationair proces, dat leidt tot **continue spanen** die over de hele lengte even dik zijn. Een dergelijk spaanvormingsproces is ideaal. Het treedt vooral op bij de taaiere werkstukmaterialen. Wanneer het werkstukmateriaal minder goed vervormbaar is, wordt het spaanvormingsproces dynamischer. Het afschuiven vindt nu als het ware stapsgewijs plaats, waardoor dunne lamellen ontstaan (zie figuur 5.3). Zo'n **lamelspaan** is aan de bovenzijde enigszins gekarteld. Lamellen zijn vaak met het blote oog waar te nemen. Verspanen is dus in wezen een plastisch omvormproces. Bij nog minder goed vervormbare materialen worden de lamellen dikker. Soms gaat de samenhang tussen de lamellen dan verloren. Dan ontstaat **brokkelspaan**.

5.3 Bewegingen, krachten, vermogen, temperatuur en gereedschapsslijtage

Bewegingen

De geometrie van een bewerkt oppervlak wordt bepaald door de geometrie van het gereedschap en de



Figuur 5.4 Bewegings- en snijkrachtcomponenten bij het draaien

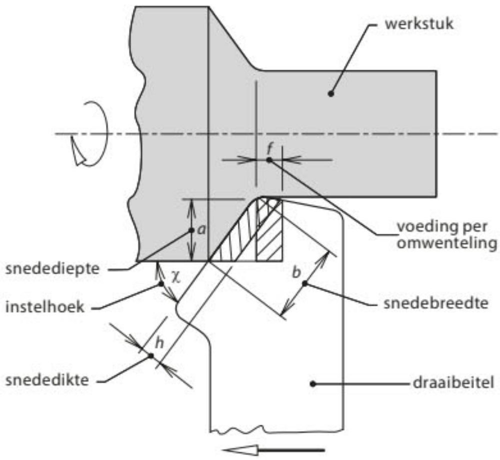
relatieve bewegingen tussen het gereedschap en het werkstuk. We onderscheiden drie soorten bewegingen:
- de **hoofdbeweging** of **snijbeweging**. Met deze continue beweging dringt de snijkant in het materiaal. Deze beweging heeft de hoogste snelheid en vereist verreweg het grootste deel van het benodigde vermogen. Karakteristiek is de **snijsnelheid** v_c (zie figuren 5.2 en 5.4).
- de **voedingsbeweging**. Ten opzichte van de snijsnelheid is dit een langzame beweging. Ze kan continu of periodiek zijn en verzorgt de voortgang van de bewerking. Karakteristiek zijn de **voedingssnelheid** v_f en de **voeding per omwenteling** f.
- de **instelbeweging**. Deze beweging brengt het gereedschap naar de juiste positie ten opzichte van het werkstuk voor de aanvang van de bewerking zelf.

Door deze bewegingen worden de kinematische grootheden van een bewerking vastgelegd. Het is de functie van het gereedschapswerktuig (zie hoofdstuk 13) om de bewegingen met de gewenste snelheden, krachten, vermogens en nauwkeurigheid uit te voeren (zie figuur 5.4).

In figuur 5.5 zie je een snededoorsnede bij een draaibewerking. We onderscheiden **snededoorsnede** A, **snedediepte** a, **snedebreedte** b, voeding f en **snededikte** h.

Krachten

De kracht F die de snijwig op het werkstuk uitoefent, is te ontbinden in drie onderling loodrechte



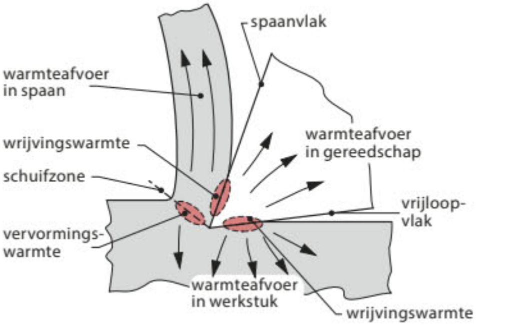
snededoorsnede : $A = a \times f = b \times h$

Figuur 5.5 Snededoorsnede bij draaibewerking

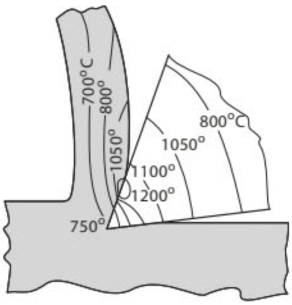
componenten (zie figuur 5.4). Verreweg de belangrijkste component is de component in de hoofdbewegingsrichting van de snijwig. Deze wordt de **hoofdsnijkracht** F_c genoemd. De grootte van deze kracht wordt bepaald door:
- het werkstukmateriaal. Toenemende hardheid en sterkte verhoogt in het algemeen de snijkracht;
- de geometrie van de snijkant. De snijkracht neemt circa 1,5% toe per graad die de spaanhoek afneemt;
- de grootte en vorm van de snededoorsnede (zie figuur 5.5). De snijkracht neemt recht evenredig toe met toenemende snedebreedte b en minder dan recht evenredig met toenemende snededikte h;
- de snijsnelheid v_c. De snijkracht neemt in geringe mate af als de snijsnelheid toeneemt.

Vermogen en temperatuur

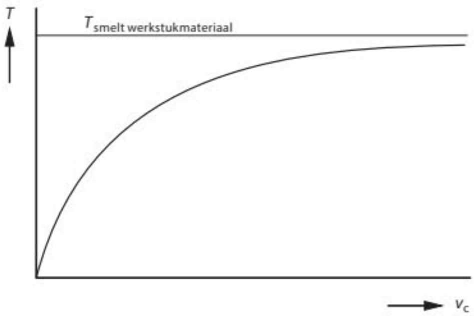
Het benodigd (netto) **snijvermogen** P_c is gelijk aan $F_c \times v_c$. Dit vermogen (energie/tijdseenheid) wordt grotendeels omgezet in warmte. Deze warmte ontstaat door de vervormingswarmte in de afschuifzone en door wrijving op de vlakken waar spaan en werkstuk langs de snijwig schuiven (zie figuur 5.6). Dit leidt tot hoge temperaturen in de snijwig. In figuur 5.7 zie je een voorbeeld van de temperatuurverdeling bij een draaibeitel. Het verband tussen snijsnelheid en temperatuur hebben we in figuur 5.8 schematisch weergegeven.
De snijwig ondervindt grote wrijvingskrachten en



Figuur 5.6 Warmteontwikkeling in de schuifzone en langs de vlakken van de snijwig



Figuur 5.7 Voorbeeld van temperatuurverdeling bij draaien



Figuur 5.8 Het verloop van de maximale temperatuur op het spaanvlak als functie van de snijsnelheid

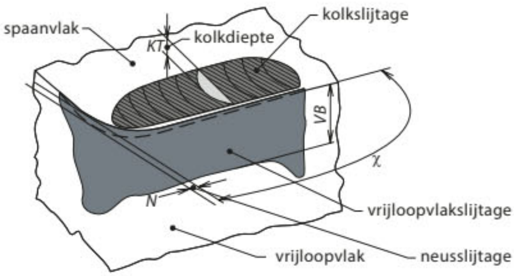
is dus onderhevig aan slijtage. De weerstand tegen slijtage wordt grotendeels bepaald door de hardheid van het snijmateriaal. Deze hardheid moet ten minste driemaal zo hoog zijn als die van het werkstukmateriaal. Het probleem van verspanende gereedschappen is dat bij alle materialen de hardheid daalt als de temperatuur toeneemt. Bij gehard staal komt dit door een structuurverandering in het materiaal, waardoor de hardheid na afkoeling niet meer terugkeert. Men noemt dit **ontlaten** (zie paragraaf 10.2.2).

Van fundamenteel belang voor de verspaningstechniek is het ontwikkelen van snijmaterialen die ook bij hogere temperaturen hun hardheid behouden. Deze eigenschap wordt **warmhardheid** genoemd.

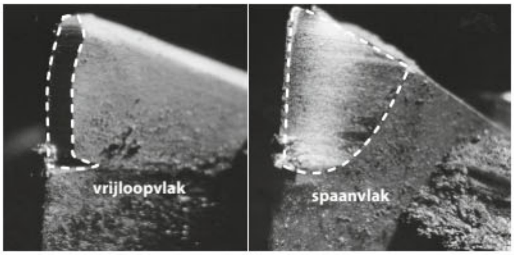
Slijtagevormen, standtijd

Slijtage van de snijwig treedt op aan het spaanvlak en aan het vrijloopvlak (zie figuur 5.9 en figuur 5.10). Bij het spaanvlak gebeurt dit vooral in de vorm van **kolkslijtage**. Dit is een uitholling in het spaanvlak op een kleine afstand van de snijkant. **Vrijloopvlakslijtage** veroorzaakt een afgesleten vlakje op de snijkant. Door de **neusslijtage** neemt de ingestelde snedediepte af en ontstaat er een maatafwijking.

Een veelgebruikte maatstaf voor de kolkslijtage is de diepte van de kolk *KT*. Voor de vrijloopvlakslijtage kijkt men naar de breedte van het gesleten vlakje *VB*. Als maatstaf voor de neusslijtage wordt het terugtrekken van de snijkant *N* bij de beitelpunt gemeten. Een te hoge *KT* kan leiden tot uitbreken van de snijwig, een te hoge *VB* resulteert in een slechte oppervlaktekwaliteit en maatafwijkingen. Voor beide waarden wordt daarom een uiterste grens gehanteerd, het **slijtagecriterium**.



Figuur 5.9 Slijtage van de snijwig



a b

Figuur 5.10 Op de foto's is met een stippellijn de vrijloopvlakslijtage (a) en de kolkslijtage (b) aangegeven (Universiteit Twente)

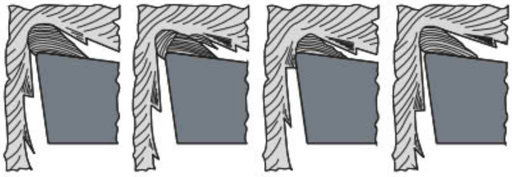
Het overschrijden van een van deze slijtagecriteria betekent het einde van de gebruiksduur van het gereedschap. Deze gebruiksduur noemen we de **standtijd** *T*. Bij sommige toepassingen rekent men met de weg die de snijwig over het werkstuk heeft afgelegd, de **standlengte** *L* (standtijd × snijsnelheid). Men kijkt ook wel naar het **standtal** *N*, het aantal producten dat in de standtijd is gemaakt. Bij boren kunnen we de standlengte definiëren als de gezamenlijke lengte van de gaten die tijdens de standtijd zijn geboord. Na het bereiken van de standtijd kan het gereedschap soms opnieuw worden geslepen. In andere gevallen is het meestal voordeliger het gereedschap te vervangen door een nieuw exemplaar.

5.4 Snijmaterialen

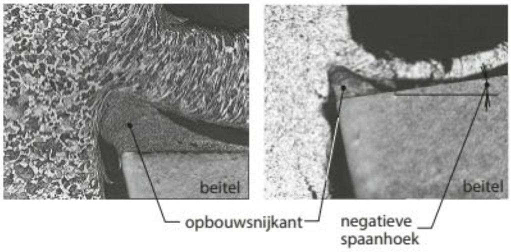
Behalve warmhardheid worden er nog andere eisen gesteld aan het snijmateriaal:
- bestendigheid tegen stotende of sterk variërende belastingen, ofwel de **breukbestendigheid**;
- bestendigheid tegen frequente belastingwisselingen (**vermoeiing**) en temperatuurwisselingen (**thermoshock**),
- bestendigheid tegen oxidatie, en tegen de neiging van werkstukmaterialen om zich aan het gereedschap te hechten, dus tegen de vorming van een **opbouwsnijkant** (zie figuren 5.11 en 5.12).

Vooral de eerste twee eisen zijn strijdig met de eis van een hoge warmhardheid. Bij het kiezen van een snijmateriaal moet dus steeds een compromis gesloten worden, dat afhangt van de omstandigheden. De belangrijkste variabelen hierbij zijn:
- het te bewerken materiaal;
- het type en de aard van de bewerking;
- het type en de vorm van het gereedschap.

Behalve eisen die voortkomen uit de functie van snijmaterialen zijn er praktische eisen. Deze hebben allemaal te maken met de mogelijkheden om op goedkope wijze uit de snijmaterialen gereedschappen te vervaardigen. Hiertoe behoren:
- de prijs;
- de bewerkbaarheid, zowel bij de vervaardiging als bij het (her)slijpen;
- de constantheid van eigenschappen;
- de verkrijgbare vormen en afmetingen van het uitgangsmateriaal;



Figuur 5.11 Stadia in de vorming van een opbouwsnijkant: maximum (1), afbreken (2), aangroeien (3), maximum (4)



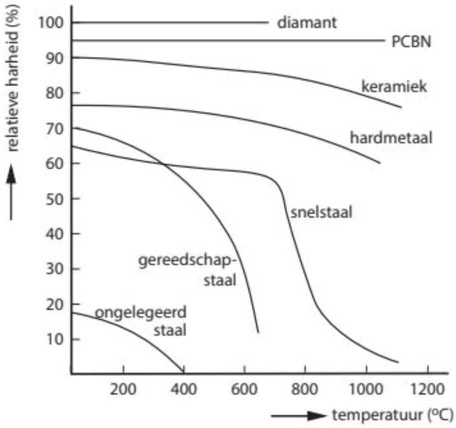
Figuur 5.12 Voorbeeld van opbouwsnijkanten bij twee verschillende spaanhoeken, bij een spaanhoek van 0° (a) en bij een negatieve spaanhoek (b) (metallografische microscoopfoto, TU Delft)

- de mogelijkheid om de snijdende elementen van het gereedschap te verbinden met de dragende elementen daarvan (zie verderop in deze paragraaf onder 'Toepassingen').

Om aan deze uiteenlopende eisen te kunnen voldoen, heeft men in de loop van de tijd een groot aantal verschillende snijmaterialen ontwikkeld. Deze zijn in te delen in verschillende groepen. We hebben ze op volgorde van warmhardheid gezet, met het materiaal met de minste warmhardheid bovenaan:
- ongelegeerd en gelegeerd gereedschapsstaal;
- snelstaal (HSS, High Speed Steel);
- hardmetaal (HM);
- cermets;
- keramisch materiaal;
- polykristallijn kubisch boriumnitride (PCBN);
- diamant;
- gecoate snijmaterialen.

Ongelegeerd en gelegeerd gereedschapstaal

Bij **gereedschapsstaal** met 0,9-1,2% C is door harden een hoge hardheid te bereiken. Door ontlaten treedt reeds vanaf 200 °C een blijvende daling van de hardheid op. Door het gereedschapsstaal te legeren met bijvoorbeeld mangaan en vanadium is een beperkte



Figuur 5.13 Het verloop van de hardheid met de temperatuur voor verschillende snijmaterialen

verhoging van de toelaatbare temperatuur te bereiken. Deze grens beperkt de toelaatbare snijsnelheid bij het bewerken van staal tot 0,1-0,2 m/s. Dit is voor huidige begrippen een zeer lage snelheid. Deze materialen hebben voor het verspanen van metalen dan ook voornamelijk nog historische betekenis. In figuur 5.13 hebben we het verloop van de hardheid als functie van de temperatuur aangegeven voor de belangrijkste snijmaterialen.

Snelstaal

Een belangrijke doorbraak was de ontwikkeling door Taylor en White (uit de VS) van **snel(draai)-staal**. Dit materiaal wordt veelal aangeduid met de Engelstalige afkorting **HSS** (*High Speed Steel*). De oorspronkelijke versie kwam op de markt in 1900. Snelstaal is staal gelegeerd met metalen die zich tijdens de voortbrenging en de warmtebehandeling van het metaalkoolstof uitscheiden in de vorm van **metaalcarbiden**, metaal-koolstofverbindingen. De meest toegepaste legeringselementen zijn wolfram, chroom, vanadium en molybdeen. Het oorspronkelijke snelstaal, het zogenaamde 18-4-1, was gelegeerd met 0,8% C, 18% W, 4% Cr en 1% V. Naderhand zijn andere varianten ontwikkeld. Ten dele ter vervanging van het schaarse wolfram, maar ook om de eigenschappen van snelstaal verder te verbeteren. Deze snelstaalsoorten worden nog steeds veel toegepast, vooral voor gereedschappen met een complexe vormgeving zoals spiraalboren en frezen.

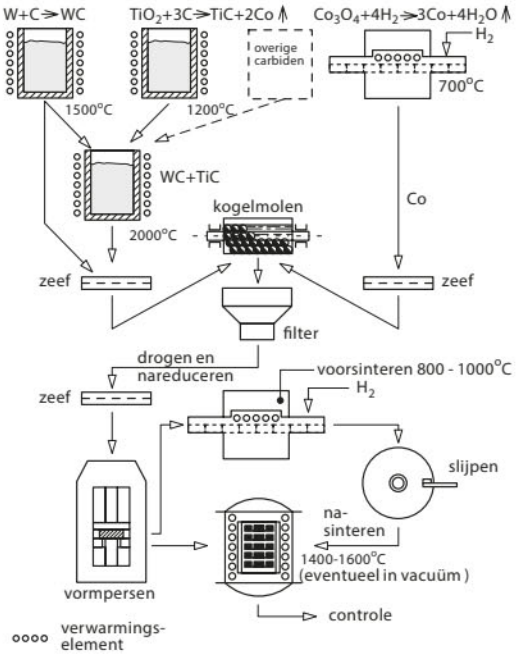
De hardheid van snelstaal bij kamertemperatuur is lager dan die van oorspronkelijke gereedschapsstalen, maar de warmhardheid is veel beter. De toelaatbare temperatuur van 500-550 °C leidt bij het bewerken van staal tot een toelaatbare snijsnelheid van 0,3-0,5 m/s. Een verdere verhoging van de warmhardheid en snijsnelheid wordt verkregen door 4,5-15% kobalt toe te voegen in de vorm van metaal (dus geen metaalcarbide). Omdat de kobaltsnelstalen moeilijk te bewerken zijn, worden ze vooral toegepast bij gereedschappen met eenvoudige vormen, zoals draaibeitels. De toelaatbare temperatuur van kobaltsnelstalen bedraagt 550-600 °C, de toelaatbare snijsnelheid 0,5-1 m/s.

Een gerelateerde ontwikkeling van snelstaal is die van gesinterd snelstaal, verkregen vanuit de vaste, poedervormige toestand. Deze materialen zijn duurder, maar hebben een gunstige combinatie van slijtagebestendigheid en taaiheid. Zij kunnen bijvoorbeeld worden toegepast bij kleine gereedschappen, zoals boren en frezen met diameters tot circa 10 mm.

Hardmetaal

In 1926 verscheen de Duitse firma Krupp op de markt met een nieuw, revolutionair snijmateriaal onder de merknaam WIDIA (met de slogan 'Hart wie Diamant'). **Hardmetaal** is een composiet van metaalcarbiden in een grondmassa van kobalt. Het is dus in feite geen metaal. Het materiaal wordt vervaardigd met poedermetallurgie, het onder hoge druk samenpersen en vervolgens verhitten van een poedermengsel. Dit proces hebben we behandeld in paragraaf 3.15.

Figuur 5.14 geeft het proces voor hardmetaal weer. Deze figuur laat zien dat het sinteren in één stap of in twee stappen kan gebeuren. In het eerste geval wordt het gereedschap bij het persen in de uiteindelijke vorm gebracht, in het tweede geval vindt vóór het nasinteren een verspanende bewerking plaats. Hardmetaal bestaat uit carbiden van metalen met een hoog smeltpunt, zoals wolfram (W), tantalium (Ta), molybdeen (Mo), titanium (Ti), niobium (Nb), met als bindmiddel kobalt (Co). De eigenschappen van het hardmetaal zijn sterk te beïnvloeden door het variëren van de samenstelling. Bij een laag gehalte aan bindmiddel is het hardmetaal hittebestendig en hard maar bros, bij een hoger gehalte aan bindmiddel is het taaier, maar minder hittebestendig. Door de juiste keuze van de verhouding tussen de metaalcarbiden en

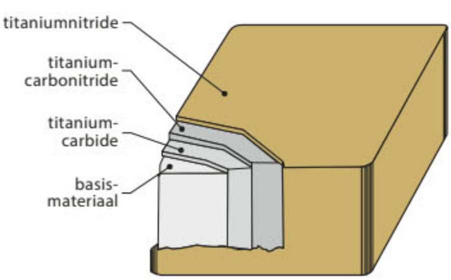


Figuur 5.14 Fabricageproces van hardmetaal

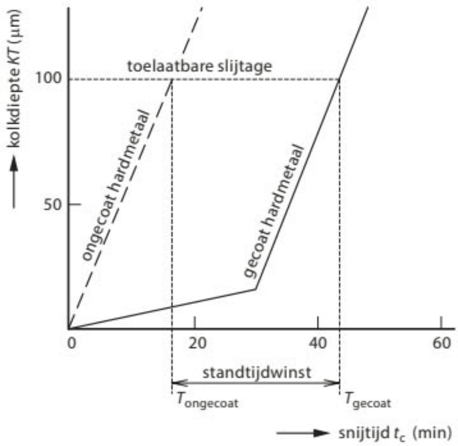
het bindmiddel is het hardmetaal aan te passen aan veel verschillende werkstukmaterialen. Hierdoor is een grote en veelzijdig toepasbare familie van hardmetaalsoorten ontstaan.

Gecoate snijmaterialen

Je ziet dat men steeds een compromis tussen slijtagebestendigheid en taaiheid moet sluiten. Het kan daarom gunstig zijn een taaie hardmetaalsoort te voorzien van een dunne (2-20 µm), maar zeer slijtagebestendige deklaag. Men spreekt dan van hardmetaal met **coating**. Deze deklagen hebben een hogere oppervlaktehardheid, vertonen minder wrijving en



Figuur 5.15 Gecoat hardmetalen beitelplaatje. De coating bestaat uit 3 lagen



Figuur 5.16 Vergelijking van het slijtageverloop van hardmetaal, gecoat en ongecoat

worden opgebracht door verschillende fysische processen, zoals opdampen (PVD, *phyiscal vapour deposition*), of door chemische processen (CVD, *chemical vapour deposition*). Voorbeelden van toegepaste lagen zijn TiC, TiN, (hebben een opvallende goudkleur), Al_2O_3 en DLC (*diamond-like carbon*). Om de gewenste eigenschappen te verkrijgen wordt er vaak meer dan één laag toegepast (multicoating-materialen, zie figuur 5.15). Figuur 5.16 toont het effect van een coating op het slijtageverloop.
Tegenwoordig worden ook snelstalen gereedschappen vaak van een coating voorzien.

De hoogst toelaatbare temperatuur van hardmetaal ligt rond 1200°C. Dit leidt tot toelaatbare snijsnelheden voor het bewerken van staal van 1-10 m/s, bij gecoate soorten nog hoger. Tegenwoordig is hardmetaal het meest toegepaste snijmateriaal.

Cermets

Cermets zijn materialen die bestaan uit een harde, anorganische stof – dus een keramiek – in een metallische matrix (*CERamic METals*). Een aantal daarvan is goed bruikbaar als snijmateriaal, vooral bij hoge snijsnelheden en een ononderbroken snede met een kleine snededoorsnede. Oftewel: bij hoge temperaturen en een lage mechanische belasting. De harde stof is meestal een metaalcarbide, metaalnitride, of metaaloxide. Het bindmiddel is meestal een mengsel van Fe, Ni, Mo en Co. In wezen behoort hardmetaal dus ook tot de cermets, maar wegens de circa 50% hogere snijsnelheid beschouwen we

hardmetalen toch als een aparte groep. De grote doorbraak van cermets in Europa vond pas rond 1990 plaats.

Keramisch snijmateriaal

Keramisch snijmateriaal werd in eerste instantie ontwikkeld als vervanger van hardmetaal wegens de schaarste aan wolfram tijdens de Tweede Wereldoorlog. Het meest toegepaste basismateriaal is Al_2O_3 (wit keramiek), soms gemengd met TiC (zwart keramiek). Het wordt gefabriceerd door middel van een sinterproces. Een modern keramisch materiaal is Si_3N_4. Dit keramiek levert vooral goede resultaten bij de bewerking van gietijzer. De warmhardheid is flink hoger dan bij hardmetaal; de hoogst toelaatbare temperatuur bedraagt circa 1500 °C. De haalbare snijsnelheden kunnen oplopen tot meer dan 1200 m/min. De zeer hoge warmhardheid brengt wel met zich mee dat het materiaal erg bros is. Dit beperkt de toepassingen tot gevallen met gunstige verspaningscondities (continue snede, kleine snededoorsnede, geen trillingen). De soorten keramiek gemengd met TiC zijn iets taaier. Een veelvoorkomende toepassing hiervan is het draaien van gietijzer en van hittebestendige en harde legeringen.

Polykristallijn kubisch boriumnitride (PCBN)

Boriumnitride kristalliseert onder zeer hoge druk en temperatuur tot een polykristallijne kubische structuur. Op deze wijze ontstaat **polykristallijn kubisch boriumnitride (PCBN)**, een materiaal dat de hardheid en daarmee ook de slijtagebestendigheid van diamant benadert. Bovendien is het, in tegenstelling



Figuur 5.17 Opengezaagde gehard stalen kogelomloopmoer, gedraaid met PCBN (a) en non-ferrowerkstukken, gedraaid met diamant (b) (Hembrug)

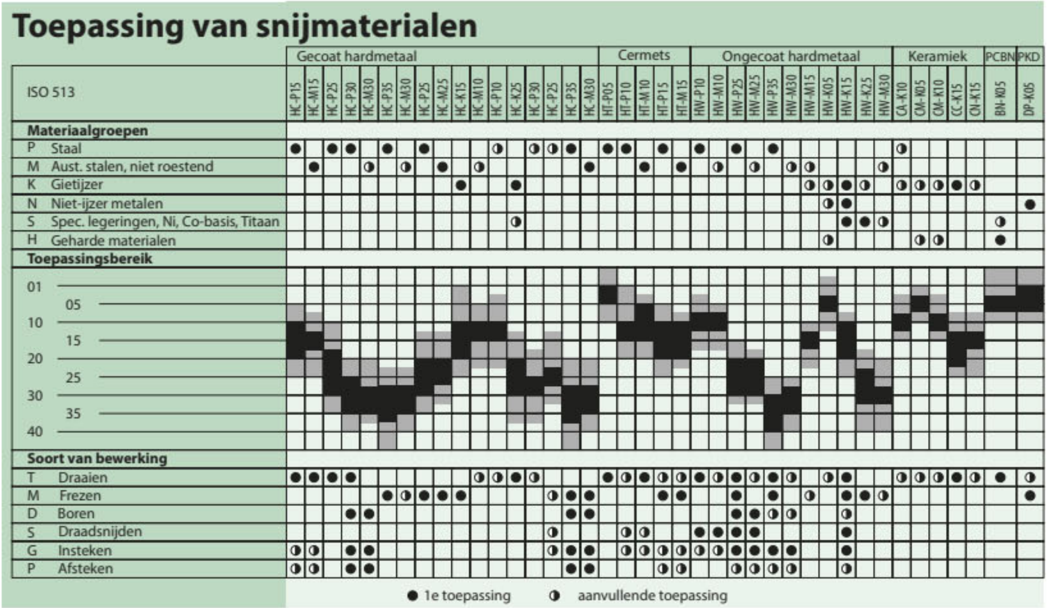
tot diamant, bestand tegen hoge temperaturen (tot circa 1800 °C). Dit maakt PCBN, evenals sommige keramische materialen, uitermate geschikt voor het verspanen van gehard staal. In dit verband wordt de term **hardverspanen** gebruikt (zie figuur 5.17a en paragraaf 5.15).

Diamant

Diamant is het hardste bekende materiaal. De beperkte stabiliteit begrenst de toelaatbare temperatuur echter tot 600-700°C. Bij het verspanen van ferrometalen zoals staal en gietijzer neemt het werkstuk bovendien koolstof uit het diamant op, waardoor dit degradeert. Een belangrijke toepassing van diamant als snijmateriaal is daarom het nabewerken van non-ferrometalen zoals koper, messing en aluminium. Let bij de voorbeelden in figuur 5.17b op de buitengewoon hoge oppervlaktekwaliteit. Met het blote oog ziet het oppervlak eruit als een perfecte spiegel. Natuurlijk diamant in grotere afmetingen is uiterst kostbaar. Men maakt er daarom alleen maar gereedschappen van met zeer korte snijkanten. Kunstmatig diamant ontstaat gewoonlijk in kleine korrels. Door een sinterproces kan men dit, eventueel met een bindmiddel, verwerken tot platen. Meestal wordt een laag **polykristallijn diamant (PKD)** gesinterd op een hardmetalen schijf. Deze schijf kan tegenwoordig maximaal een diameter hebben van 70 mm. Hij wordt door lasersnijden of draadvonken (zie hoofdstuk 6) verder verwerkt tot snijkanten, die op een gereedschapshouder worden gesoldeerd. Dergelijke gereedschappen zijn uitstekend geschikt voor het verspanen van werkstukmaterialen die bij andere snijmaterialen sterke slijtage veroorzaken. Voorbeelden hiervan zijn vezelversterkte kunststoffen, composietmaterialen met een metaalmatrix, hardmetaal en eutectische aluminium gietlegeringen. Zeer nauwkeurige oppervlakken kunnen niet worden bewerkt, omdat vanwege het polykristallijne karakter van diamant geen voldoende strakke snijkanten mogelijk zijn. PCBN en diamanten gereedschappen zijn zeer kostbaar.

Overige snijmaterialen

Er worden nog steeds nieuwe materialen ontwikkeld waarvan men verwacht dat ze als snijmateriaal dienst kunnen doen. Soms maken deze materialen enige opgang omdat ze door een unieke combinatie van eigenschappen in een bepaald smal toe-



Figuur 5.18 Overzicht van de norm ISO 513: aanduiding van de toepassingsgebieden van snijmaterialen

passingsgebied in een specifieke behoefte kunnen voorzien.

Aanduiding van snijmaterialen

In het algemeen worden materialen aangeduid op grond van hun samenstelling. De eigenschappen zijn in normen vastgelegd. De ontwerper kan dus aan de hand van de optredende belasting tijdens het gebruik een materiaal met passende eigenschappen kiezen. Dit geldt ook voor de staalsoorten die worden toegepast als gereedschapmateriaal voor omvormen en verspanen, zoals snelstaal.
Bij de nieuwere snijmaterialen heeft men deze werkwijze echter verlaten. Zij worden aangeduid op grond van hun toepassingsgebied. Hierdoor heeft een fabrikant van snijmaterialen de vrijheid om voor een bepaald toepassingsgebied het meest geschikte snijmateriaal te ontwikkelen.

De ISO-norm 513 regelt de aanduiding van de toepassingsgebieden van alle snijmaterialen, behalve gereedschapsstaal en snelstaal (zie figuur 5.18). De aanduiding bestaat uit drie letters en twee cijfers, waarvan de eerste twee letters de hoofdgroep aangeven:

HC	gecoat hardmetaal
HW	onbekleed hardmetaal op wolframbasis
HT	cermets
CA	keramiek op aluminium basis
CM	keramiek op siliciumnitride basis
CC	gecoat keramiek
CN	keramiek op siliciumnitride basis
BN	polykristallijn kubisch boriumnitride (PCBN)
DP	polykristallijn diamant (PKD)

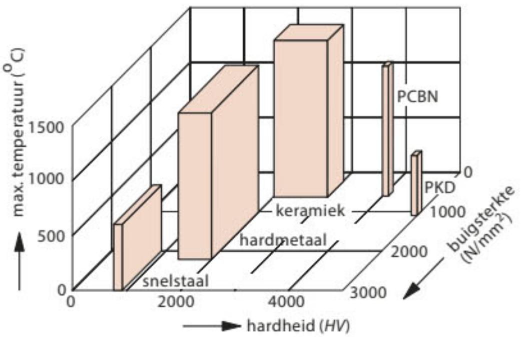
De derde letter betreft een indeling van werkstukmaterialen in groepen waarvoor het snijmateriaal het meest geschikt is:

P	staal (afgezien van de apart genoemde groepen staalsoorten)
M	corrosievast staal, austenitisch staal
K	gietijzer, ferrometalen, legeringen op Ni-, Ti- en Co-basis, geharde materialen
N	non-ferrometalen, niet-metallische materialen, keramiek, kunststoffen en composieten
S	hittebestendige legeringen op basis van Ni en Co, titanium en Ti-legeringen
H	geharde materialen, RVS-series 300 en 400, gesinterde carbiden

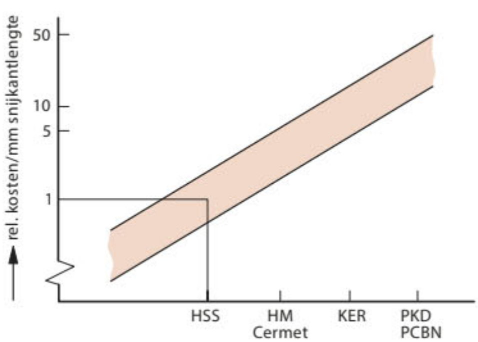
De twee cijfers geven de mechanische belastbaarheid aan. Een laag getal duidt op geschiktheid voor een kleine snededoorsnede zonder onderbrekingen of kans op stoten of trillingen. Deze situatie doet zich vooral voor bij het nabewerken met als doel een

hoge maatnauwkeurigheid en/of lage oppervlakteruwheid. Het snijmateriaal is dan hard en hittebestendig, maar bros. Men kan hoge snijsnelheden toepassen. Een hoog getal duidt op geschiktheid voor hoge snijkrachten en dynamische belastingen. Dit doet zich vooral voor bij het voorbewerken met een zo groot mogelijke snededoorsnede en bij het verspanen met onderbroken snede, bijvoorbeeld bij het frezen. Het snijmateriaal is dan taai, maar minder hittebestendig. De toegelaten snijsnelheid is lager.
Sommige leveranciers hanteren commerciële aanduidingen van de soort snijmateriaal. Deze zijn niet genormaliseerd. Hierbij wordt steeds een aanduiding van de eerste toepassing en van de aanvullende toepassing gegeven.

Voorbeeld:
Snijmateriaal met soortaanduiding HC-M25 is een gecoat hardmetaal. Het wordt aanbevolen voor het toepassingsgebied M25, corrosievast austenitisch staal, bewerkingssoort frezen. Het hoofdtoepassingsbereik ligt tussen 20 en 27, de aanvullende



Figuur 5.19 Overzicht van de eigenschappen van snijmaterialen



Figuur 5.20 Prijsvergelijking van snijmaterialen

gebieden lopen tot 12 en 32. Als soort bewerking is frezen aanbevolen.

De prestaties van snijmaterialen die geschikt zijn voor hetzelfde toepassingsgebied, maar tot verschillende hoofdgroepen behoren, kunnen aanzienlijk verschillen. Dit geldt ook voor de prijzen ervan. Dat is bijvoorbeeld het geval bij HC-K15 en CC-K15. Ook tussen soorten snijmateriaal uit dezelfde hoofdgroep en met hetzelfde toepassingsgebied, maar van verschillende leveranciers, treden soms grote verschillen in prestaties op. Je moet je overigens realiseren dat de prestaties van een gereedschap niet alleen afhangen van de samenstelling van het snijmateriaal. Ook de vorm, de geometrie van de snijkanten en de kwaliteitsbeheersing bij de fabricage zijn van belang.

Zie voor een overzicht van de combinatie van eigenschappen van snijmaterialen figuur 5.19 en voor een overzicht van de prijzen per snijkant figuur 5.20.

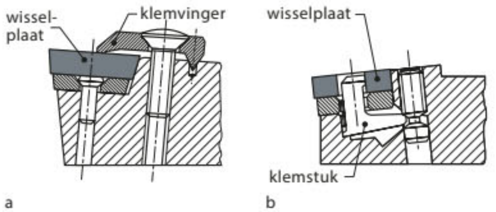
Toepassingen

In de huidige praktijk worden snelstaal, hardmetaal (inclusief cermets) en keramisch materiaal verreweg het meest toegepast. De verdeling kan worden afgemeten naar het verbruik, uitgedrukt in geld, en naar de opbrengst, uitgedrukt in het volume van het verspaand materiaal. Een voorbeeld van een verdeling zie je in figuur 5.21.

Snelstaal kan gezien de prijs en taaiheid worden gebruikt voor het maken van gereedschappen uit één stuk. Hardmetaal is hiervoor veel te bros en te kostbaar, en keramiek zeker. Deze materialen worden toegepast in de vorm van **snijplaten** die op een stalen houder worden gesoldeerd of geklemd. Gesoldeerde snijplaten worden na verbruik herslepen. Tegenwoordig is het gebruikelijk dat de snijplaten zijn voorzien van 2-8 verwisselbare snijkanten. Na verbruik van de snijkanten worden de plaatjes vervangen door nieuwe. Dit noemen we

Snijmateriaal	Verbruik (%) in geld	Opbrengst (%) in verspaand volume
snelstaal	48	15
hardmetaal, cermets	40	77
keramiek	4	4
PCBN, diamant	8	4

Figuur 5.21 Verdeling in de toepassing van snijmaterialen in de metaalbewerking



Figuur 5.22 Klemsystemen

wisselplaten. Er bestaan veel klemsystemen die niet genormaliseerd zijn. In figuur 5.22 zie je hiervan twee voorbeelden. De vormen en afmetingen van de meest voorkomende wisselplaten en klemgereedschappen zijn wel genormaliseerd.

Ter afsluiting van deze paragraaf merken we op dat het toepassen van snijmateriaal dat hogere snijsnelheden mogelijk maakt, alleen zin heeft als de machine daarvoor geschikt is. Dit betekent dat de machine over hoge toerentallen en een hoog vermogen moet beschikken en ook een grote dynamische stabiliteit moet hebben. Voor dit laatste moet de machine zeer stijf geconstrueerd zijn. Bij handbediende machines blijkt steeds weer dat degene die de machine bedient de beperkende factor is. Bij numeriek bestuurde machines vervalt dit bezwaar uiteraard. Vanwege de hoge kosten van dergelijke machines worden veel hogere snijsnelheden toegepast. Ondanks de meerkosten van hoogwaardige gereedschappen kan men zo toch goedkoper produceren (zie figuur 5.27).

5.5 Standtijd en optimale snijsnelheid

In paragraaf 5.3 lieten we al zien dat de standtijd van de snijwig wordt begrensd door de maximum toelaatbare slijtage. Het bereiken van de gestelde grens voor de kolkdiepte *KT* of de breedte van de vrijloopvlakslijtage *VB* betekent het einde van de gebruiksduur van de snijwig. Een *KT* van 0,1 mm en een *VB* van 0,3 mm zijn gebruikelijk. De exacte waarden hangen echter af van de bewerking – ruwen/nabewerken. In de figuren 5.23a en b is het verloop van *KT* en *VB* uitgezet als functie van de verspaningstijd voor drie verschillende snijsnelheden v_c. In figuur 5.23c en d is, met dezelfde gegevens, de standtijd *T* uitgezet als functie van de snijsnelheid. Dit geldt ook voor de figuren 5.23e en f, maar dan met logaritmische schalen. De waarnemingen blijken dan, bij benadering, op een rechte lijn te liggen.

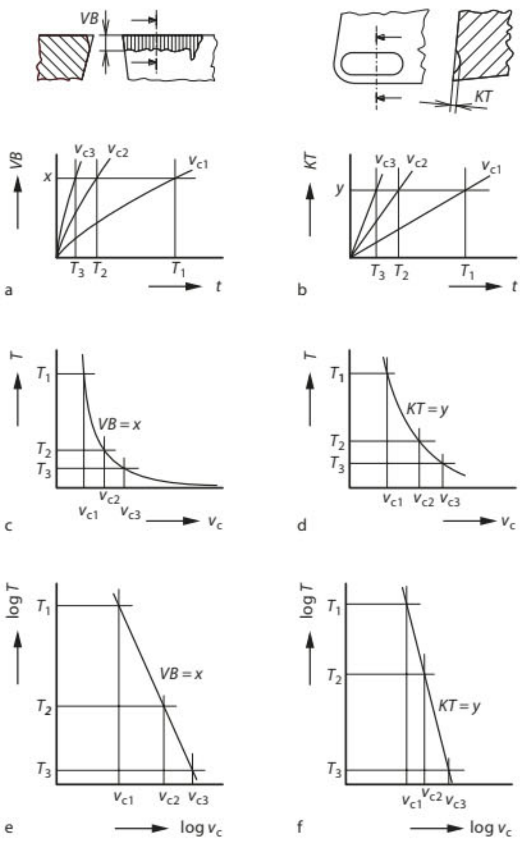
Dit betekent dat het verband met een eenvoudige wiskundige formule is weer te geven. Dit verband is voor het eerst vastgesteld door Taylor, de 'uitvinder' van het snelstaal. De relatie staat dan ook bekend als de **formule van Taylor** en luidt:

$$v_c \times T^n = C$$

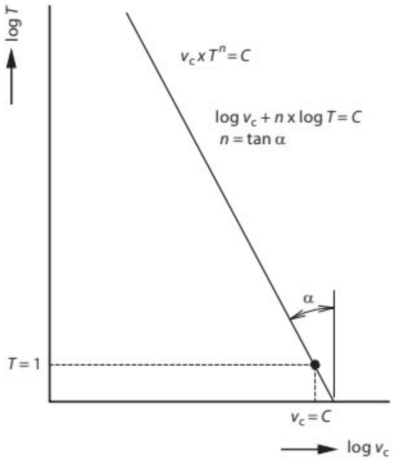
NB: De standtijd wordt gewoonlijk in minuten uitgedrukt. Dit maakt het noodzakelijk de snijsnelheid in deze formule in m/min uit te drukken.
De Taylor-formule kan ook als volgt geschreven worden:

$$\log v_c + n \times \log T = \log C$$

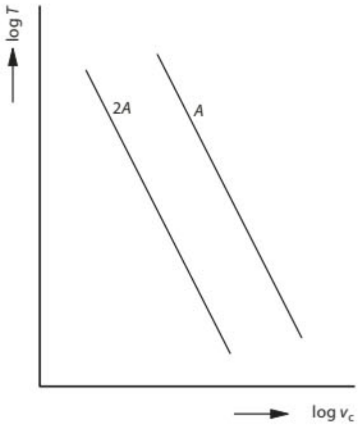
Aan de laatste schrijfwijze zien we meteen dat het verband in een grafiek met logaritmische schalen een rechte lijn oplevert. De waarde van *n* bepaalt de helling van de lijn en dus hoe sterk de standtijd afneemt als de snijsnelheid toeneemt. De waarde van *C* bepaalt een punt van de lijn. Voor $T = 1$ geldt $v_c = C$ (zie figuur 5.24).



Figuur 5.23 De standtijd *T* als functie van de snijsnelheid v_c



Figuur 5.24 Bepaling van de lijn $v_c - T$



Figuur 5.26 Verplaatsing van de lijn $v_c - T$ bij veranderende snededoorsnede *A*

De waarde van *n* hangt af van de combinatie werkstukmateriaal en snijmateriaal. Deze waarde is een maat voor de temperatuurgevoeligheid van het gereedschap. Een lagere waarde van *n* betekent een sterkere daling van de standtijd met toenemende v_c. In figuur 5.25 geven we enkele representatieve waarden voor *n* en *C*.

De waarden voor *C* zijn slechts indicatief, aangezien deze van veel factoren afhangen, zoals van de combinatie van werkstuk- en snijmateriaal, de geometrie en de snededoorsnede. *C* wordt mede bepaald door de gekozen waarden van *KT* en *VB*. Voor een grotere snededoorsnede geldt een lagere waarde van *C* (zie figuur 5.26). Een grotere snededoorsnede veroorzaakt een hogere belasting van de snijwig, een hogere temperatuur en dus een lagere standtijd. Als alternatief kan bij dezelfde standtijd een lagere snijsnelheid worden gekozen. Dit brengt ons op de volgende vraag: welke snijsnelheid moet je kiezen?

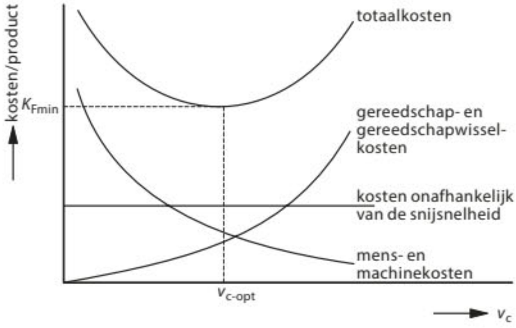
De optimale snijsnelheid

Het verhogen van de snijsnelheid leidt tot lagere bewerkingstijden en dus tot lagere snijkosten. Daartegenover staat een meer dan evenredige daling van de standtijd van het gereedschap, dus een stijging van de gereedschapskosten per product (zie figuur 5.27). Bovendien moet aan het einde van de standtijd het gereedschap worden verwisseld en zo nodig opnieuw worden ingesteld. Dit gaat gepaard met tijdverlies. De combinatie van snijkosten en gereedschaps(wissel)kosten kent dus een minimum bij een bepaalde snijsnelheid. Dit noemt men de **optimale snijsnelheid** $v_{c\text{-opt}}$.
In plaats van naar de kosten, kan men overigens ook optimaliseren naar de productietijd. Dit leidt altijd

Werkstukmateriaal	R_m (MPa)	n	C	$k_{c1.1}$ (MPa)	ε
staal: St 70-2	824	0,19	200-400	1600	0,32
staal: Ck 45 N	657	0,22	300-500	1660	0,21
staal: 20 MnCr 5	588	0,28	500-700	1520	0,24
gietijzer: GG 30	720	0,16	100-200	900	0,41
Ni-superlegering (HRC>30)	>1030	0,24*	600-700	3300	0,24
messing	320	0,24*	1000-1300	700	0,25
Al-legering: Al Si 13-15	450	0,24*	1400-1800	700	0,26
Ti-legering: Ti 6 Al 4 V	1050	0,24*	100-200	1450	0,23

* globale richtwaarden

Figuur 5.25 Waarden voor de treksterkte R_m, de Taylor-exponent *n*, de Taylor-constante *C*, de specifieke snijkracht $k_{c1.1}$ en de exponent ε in de snijkrachtvergelijking



Figuur 5.27 Bepaling van de optimale snijsnelheid

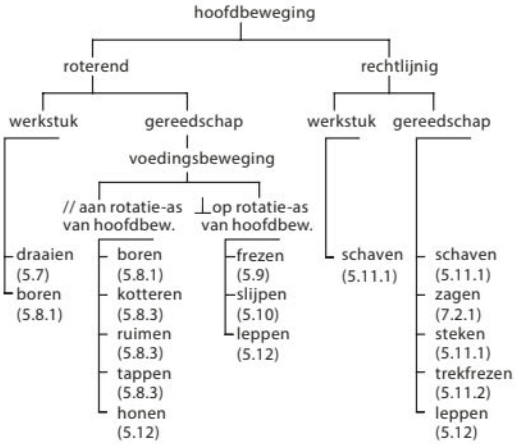
tot een hogere snijsnelheid en dus tot hogere kosten. In de meeste gevallen heeft het daarom weinig zin geld uit te geven om een uur te winnen als men een dag of een week te laat begonnen is!

In principe zou voor elk nieuw product (en materiaal) de optimale snijsnelheid opnieuw berekend moeten worden. De praktijk leert echter dat het hanteren van een vuistregel een goede benadering van de optimale snijsnelheid oplevert. Men gaat dan uit van een **optimale standtijd**. Voor klassiek (handmatig) draaien worden vaak standtijden van 10-20 minuten gehanteerd, voor frezen 60 minuten. Men duidt de bijbehorende snijsnelheid aan met v_{10}, v_{20}, respectievelijk v_{60}. Bij toenemende machine- en loonkosten neemt de optimale standtijd af. Een ruwe vuistregel (in West-Europese verhoudingen) luidt dat de optimale standtijd minder dan tien maal de gereedschapswisseltijd bedraagt.

5.6 Indeling van de verspanende bewerkingen

Er zijn twee hoofdgroepen van verspanende bewerkingen: bewerkingen met een **gedefinieerde snijkant** en bewerkingen met **ongedefinieerde snijkanten**. Bij bewerkingen met een gedefinieerde snijkant is de geometrie van het actieve gedeelte van de snijkant nauwkeurig omschreven. Bij bewerkingen met ongedefinieerde snijkanten wordt gebruikgemaakt van meerdere korrels met willekeurig gevormde snijkanten. Zie figuur 5.28 voor een indeling van de verschillende verspanende bewerkingen naar de hoofdbeweging en de voedingsbeweging (zie figuur 5.28).

In dit hoofdstuk bespreken we de volgende verspanende bewerkingen: draaien, gatbewerkingen,



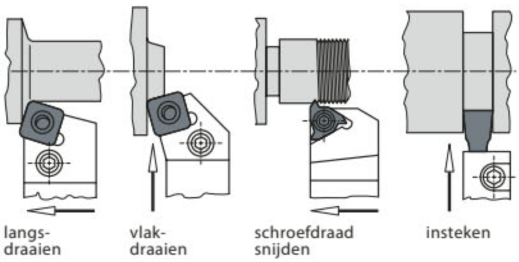
Figuur 5.28 Systematische indeling van de verspanende bewerkingen. (De betreffende paragrafen van dit boek zijn in het schema aangegeven.)

frezen, slijpen, en bewerkingen met een rechtlijnige hoofdbeweging.

5.7 Draaien

Bij **draaien** maakt het werkstuk de roterende hoofdbeweging. Het gereedschap, de **beitel**, maakt een voedingsbeweging, axiaal bij het **langsdraaien**, of radiaal bij het **vlakdraaien** en bij het **insteken** of **afsteken** (zie figuur 5.29). Door een gecombineerde axiale en radiale beweging is het mogelijk kegels of willekeurige contouren te beschrijven.

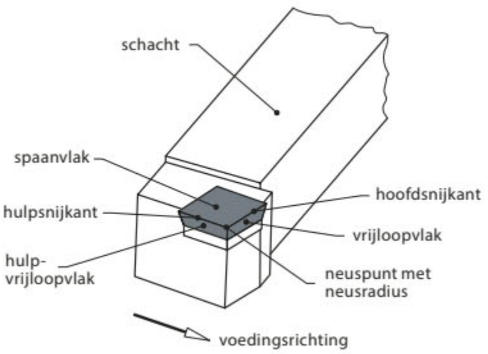
We behandelen draaien iets uitvoeriger dan de andere verspanende bewerkingen. Gezien de overeenkomsten herhalen we veel van de aspecten die hier aan de orde komen niet bij de andere processen.



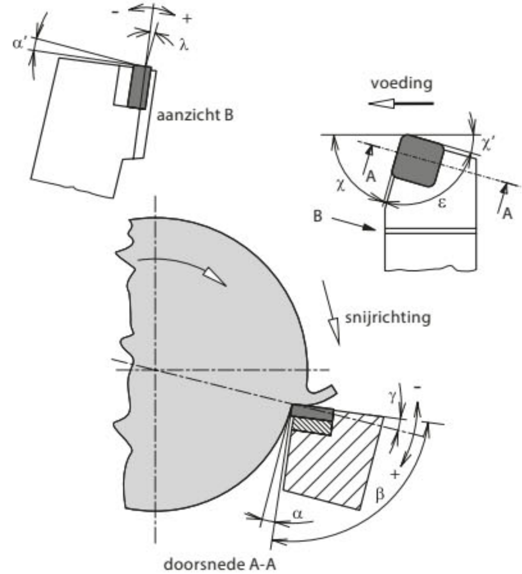
Figuur 5.29 Verschillende draaibewerkingen

5.7.1 Technologie

In figuur 5.30 hebben we het draaigereedschap afgebeeld met de genormaliseerde benamingen van de snijkanten en de vlakken van de beitel. Figuur 5.31 geeft, volgens de norm, de verschillende hoeken weer. De snededoorsnede A is het product van de snedediepte a en de voeding (verplaatsing van het werkstuk per omwenteling) f (zie figuur 5.5). Voor een gegeven werkstukmateriaal en beitel worden de snijkrachten bepaald door de snededoorsnede.



Figuur 5.30 Snijkanten en delen van het draaigereedschap



α	vrijloophoek	ε	neushoek
α′	hulpvrijloophoek	χ	instelhoek
β	wighoek	χ′	instelhoek van de hulpsnijkant
γ	spaanhoek	λ	hellingshoek

Figuur 5.31 De geometrie van de draaibeitel

De kracht die door de beitel op het werkstuk wordt uitgeoefend, kan men ontbinden in drie onderling loodrechte componenten (zie figuur 5.4). Alle drie de componenten zijn van belang als het gaat om de opspanning van het werkstuk en de stijfheid van het systeem van machine en werkstuk. De hoofdsnijkracht F_c bepaalt het moment en het vermogen dat de aandrijving van de spil moet leveren.

In figuur 5.32 zie je bijvoorbeeld de resultaten van metingen van de drie componenten van de snijkracht als functie van de voeding. De lijnen laten zien dat de snijkracht minder dan recht evenredig toeneemt met de voeding en dus met de snededoorsnede. Dit blijkt nog duidelijker uit de lijnen voor de **specifieke snijkracht**. Hiervoor zijn de snijkrachtcomponenten gedeeld door de snededoorsnede. Het is duidelijk dat dit geen constante is. Voor elke snededoorsnede geldt een andere specifieke snijkracht. Men gaat daarom uit van de specifieke snijkracht, geldig voor een snededoorsnede van 1×1 mm². Deze wordt aangeduid met $k_{c1.1}$. De hoofdsnijkracht kan berekend worden volgens:

$$F_c = k_{c1.1} \times a \times f^{(1-\varepsilon)}$$

Enkele waarden van $k_{c1.1}$ en van ε hebben we in figuur 5.25 opgenomen.
Een vergelijkbare formule geldt voor de snijsnelheid. De optimale snijsnelheid (zie paragraaf 5.5), die immers afneemt met toenemende voeding, kan berekend worden volgens:

$$v_{c\text{-opt}} = v_{c1.1} \times f^{-u}$$

Hierin is $v_{c1.1}$ de optimale snijsnelheid bij een snededoorsnede van 1×1 mm².

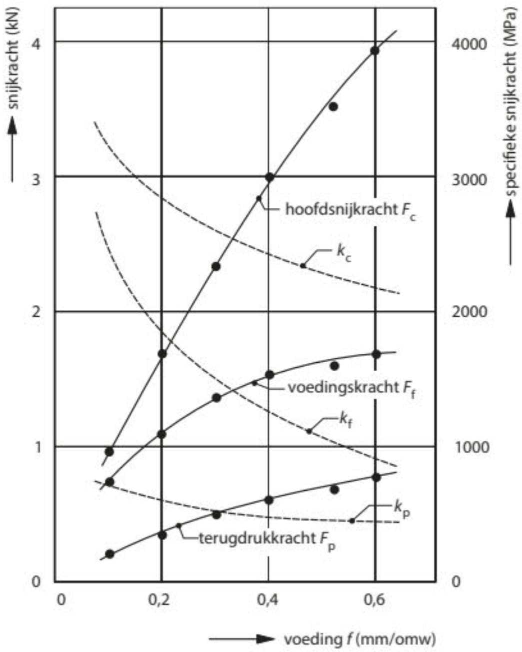
NB: Deze twee formules (voor F_c en voor $v_{c\text{-opt}}$) zijn experimenteel bepaald en zijn alleen geldig wanneer de waarde van f in mm/omw wordt ingevoerd. De exponenten ε en u hebben een waarde tussen 0 en 1. Het minteken voor de u in de laatste formule leidt tot een afnemende $v_{c\text{-opt}}$ bij een toenemende voeding f.

Voor het benodigd **verspaningsvermogen** of snijvermogen geldt:

$$P_c = F_c \times v_c$$

Het benodigd **aandrijfvermogen** volgt uit:

$$P_m = \frac{P_c}{\eta}$$



Figuur 5.32 Voorbeeld voor het verloop van de snijkrachtcomponenten en de specifieke snijkrachtcomponenten met de voeding

Hierin is η het aandrijfrendement (≈ 0,75-0,8).

De berekende waarde P_m kan groter zijn dan het beschikbare motorvermogen P_{max}. De snijsnelheid wordt dan niet beperkt door de standtijd van de beitel, maar door het beschikbaar vermogen. De maximum mogelijke snijsnelheid volgt dan uit:

$$v_{c\text{-}max} = \eta \times \frac{P_{max}}{F_c}$$

Het verspaningsmoment bedraagt:

$$M_c = F_c \times \frac{d}{2}$$

Neem voor d de nog af te draaien diameter (begindiameter).

Om de voedingssnelheid, en daarmee het voedingsvermogen, te berekenen hebben we het toerental n van het werkstuk nodig:

$$n = \frac{v_c}{\pi \times d}$$

De voedingssnelheid bedraagt:

$$v_f = f \times n$$

Voor een ruwe schatting van de voedingskracht F_f kunnen we gebruikmaken van:

$$F_f \approx (0{,}3...0{,}5) \times F_c$$

Het voedingsvermogen bedraagt:

$$P_f = F_f \times v_f$$

Het verspaand volume per tijdseenheid, de **afnamesnelheid**, is:

$$Q = a \times f \times v_c$$

Ter illustratie volgt hier een rekenvoorbeeld.
Je beschikt over de volgende gegevens:

$k_{c1.1}$ = 2000 MPa
ε = 0,3
$v_{c1.1}$ = 2 m/s
u = 0,42
d = 100 mm = 0,1 m
a = 3 mm
f = 0,3 mm/omw
F_f = $0{,}4 \times F_c$.

Bereken: F_c, $v_{c\text{-}opt}$, P_c, M_c, n, F_f, v_f, P_f, Q.

Oplossing:

$$F_c = 2000 \times 3 \times 0{,}3^{(1-0{,}3)} = 2583 \text{ N}$$

$$v_{c\text{-}opt} = 2 \times 0{,}3^{-0{,}42} = 3{,}316 \text{ m/s}$$

$$P_c = 2583 \times 3{,}316 = 8565 \text{ W} = 8{,}565 \text{ kW}$$

$$F_f \approx 0{,}4 \times 2583 = 1033 \text{ N}$$

$$v_f = 0{,}3 \times 10{,}56 = 3{,}17 \text{ mm/s} = 0{,}00317 \text{ m/s}$$

$$Q = 3 \times 0{,}3 \times 3316 = 2984 \text{ mm}^3\text{/s} \approx 3 \text{ cm}^3\text{/s}$$

$$P_f = 1033 \times 0{,}00317 = 3{,}27 \text{ W}$$

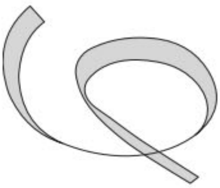
Het voedingsvermogen is dus te verwaarlozen.

Bij het voordraaien is het doel om zo snel mogelijk materiaal te verwijderen. Q neemt toe als de snededoorsnede toeneemt, ondanks de daling van $v_{c\text{-}opt}$. Men kiest dus de grootst mogelijke snededoorsnede. Ook het benodigd vermogen en moment nemen toe, zodat de machineaandrijving de beperkende factor kan vormen (zie paragraaf 5.7.4). Voor specifieke verspaningsgegevens verwijzen we naar de handboeken die worden verstrekt door de leveranciers van snijmaterialen.

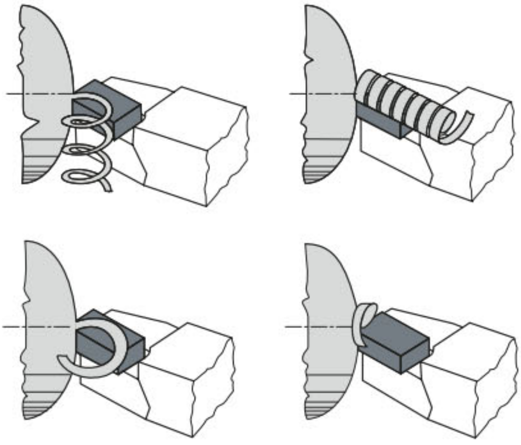
Spaanbeheersing

Bij draaien ontstaat (evenals bij boren) een doorlopende spaan. Dit kan problemen opleveren wanneer de spaan niet uit zichzelf breekt, zoals bij het draaien van taaie materialen het geval is. De spaan krijgt dan de vorm van een (gloeiend heet en scherp) lint (zie figuur 5.33). De spaan kan zich om de beitel en het werkstuk wikkelen en deze beschadigen. Dit kan bovendien gevaar opleveren voor de operator.

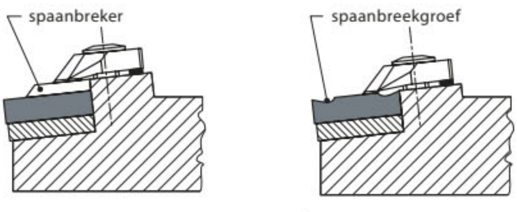
Het doel van **spaanbeheersing** is het beheerst afvoeren van de spaan. Men kan dit doen door de spaan een regelmatige spiraal te laten vormen of door hem in kleine stukjes te breken. Een combinatie hiervan is ook mogelijk. Het gedrag van de spaan is te beïnvloeden door:
- de geometrie van het snijgereedschap;
- de keuze van de snededoorsnede;
- instelgrootheden.



Figuur 5.33 Lintspaan



Figuur 5.34 Verschillende spaanvormen bij langsdraaien

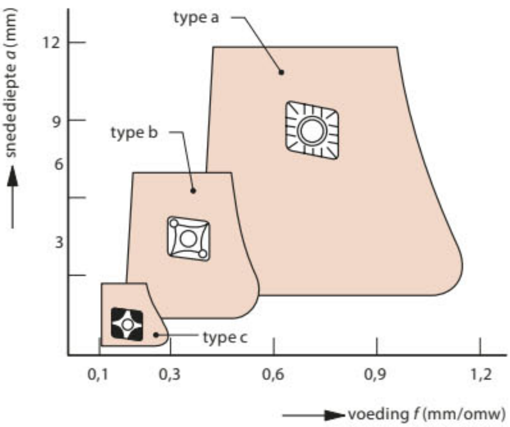


Figuur 5.35 Beïnvloeding van de spaanafloop door middel van spaanbreker (a) en spaanbreekgroef (b)

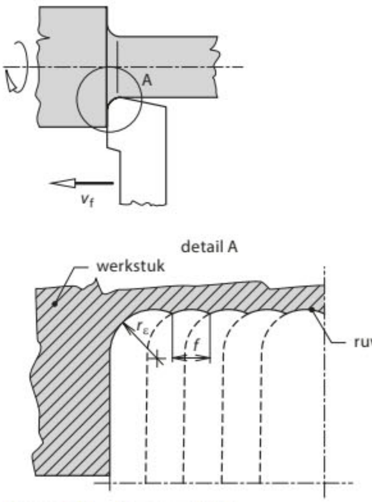
Door de juiste afstemming van instelhoek χ, spaanhoek γ en hellingshoek λ (zie figuur 5.31), is het mogelijk een krullende spaan van de gewenste vorm te verkrijgen of de spaan zodanig te buigen dat hij breekt (zie figuur 5.34).

Men kan het breken van de spaan ook bevorderen door de vorm van het spaanvlak. Hiermee kan men de spaan dwingen sterk te buigen. Hiervoor kan een afzonderlijke **spaanbreker** worden gebruikt (zie figuur 5.35a). Bij hardmetalen of keramische beitelplaten kan men **spaanbreekgroeven** aanbrengen bij het in de vorm persen van de plaat (zie figuur 5.35b).

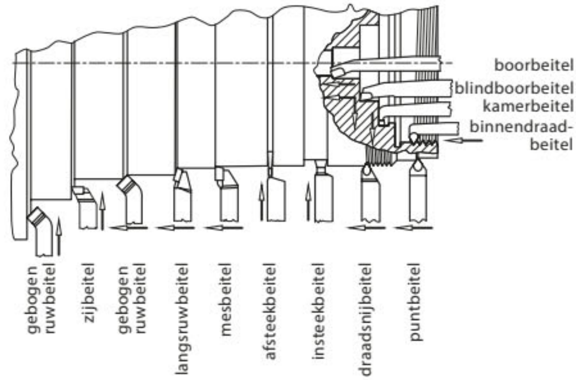
De tweede mogelijkheid is de keuze van snedediepte en voeding. Bij veel beitel- en werkstukmaterialen geeft de fabrikant aan welke combinaties van voeding en snedediepte geschikt zijn. De **spaanbreekgrafiek** in figuur 5.36 geeft voor verschillende snijplaatjes de gebieden aan van combinaties van *a* en *f*, waarbinnen de spaan zal breken. Globaal kunnen we stellen dat de verhouding snedediepte/voeding niet te hoog moet zijn. Een 'slanke' spaan zal niet snel breken. Een grote **spaanslankheid** a/f is echter juist gewenst, omdat daardoor de thermische belasting van de snijkant over een grote lengte wordt verdeeld. Ook hier kiest men dus voor een compromis. Een gebruikelijke



Figuur 5.36 Spaanbreekgrafiek voor drie typen wisselplaten voor een werkstukmateriaal



Figuur 5.37 Dwarsruwheid



Figuur 5.38 Beiteltypen

waarde voor a/f bedraagt 8-10. In de praktijk blijkt de spaanbeheersing in veel gevallen echter nog steeds een probleem te zijn.

De oppervlaktekwaliteit

De ruwheid van een bewerkt oppervlak valt uiteen in twee ruwheidscomponenten:

- de **kinematische ruwheid** of **dwarsruwheid**, die wordt bepaald door de combinatie van de voeding en de neusradius van de beitel (zie figuur 5.37);
- de **langsruwheid**, oftewel de ruwheid in de richting van de snijsnelheid. Deze kan ontstaan door het optreden van een opbouwsnijkant (zie figuur 5.11) of van trillingen.

De kinematische waarde van de ruwheid $R_{t(k)}$ kan met de neusradius r_ε en de voeding f als volgt worden berekend:

$$R_{t(k)} = r_\varepsilon - \sqrt{r_\varepsilon^2 - \frac{f^2}{4}}$$

Aangenomen dat $R_{t(k)} << r_\varepsilon$ geldt bij goede benadering:

$$R_{t(k)} = \frac{f^2}{8 \times r_\varepsilon}$$

De kinematische waarde van de ruwheid R_a kan op vergelijkbare wijze berekend worden:

$$R_{a(k)} = \frac{f^2}{32 \times r_\varepsilon}$$

Voor het nadraaien met een hoge oppervlaktekwaliteit kiest men een kleine voeding en een hoge snijsnelheid. Voor de hoogste kwaliteit is een machine met een hoge dynamische stabiliteit nodig. Dit vraagt om een stijve constructie, het vermijden of isoleren van trillingsbronnen zoals tandwielen, en een goede demping van de nog optredende trillingen. Deze trillingen worden gedeeltelijk ook door het verspaningsproces zelf gegenereerd.

Tijdens het vlakdraaien of het draaien van een kegel verandert de draaidiameter voortdurend. Hierbij is het nodig dat het toerental traploos kan variëren en zo gestuurd kan worden dat de snijsnelheid constant is. Alleen dan verkrijgt men een hoge en constante oppervlaktekwaliteit.

5.7.2 De draaibeitel

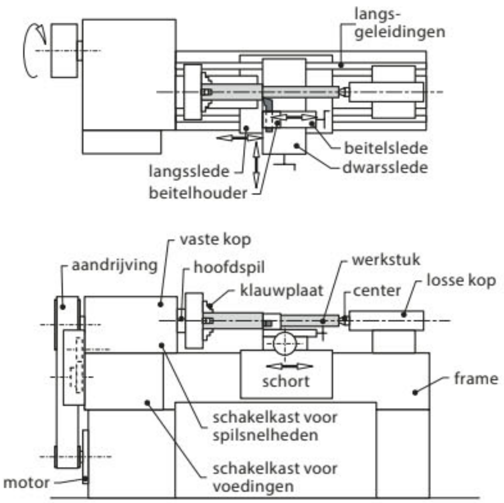
Voor de verschillende draaibewerkingen bestaat een grote verscheidenheid aan draaibeitels. De belangrijkste vormen zie je in figuur 5.38.

5.7.3 De draaimachine

De figuren 5.39 en 5.40 tonen een handbediende **centerdraaimachine**. De belangrijkste componenten van zo'n machine bespreken we hier kort: het frame, het bed, de vaste kop, de sleden en de losse kop.

Frame

De basis van elk gereedschapswerktuig is het **frame**, dat een grote stijfheid moet bezitten en in staat moet zijn ongewenste trillingen tegen te gaan. De



Figuur 5.39 Opbouw van de draaimachine



Figuur 5.40 Draaimachine (GDW)

statische stijfheid moet het optreden van ongewenste maatafwijkingen voorkomen. De dynamische stijfheid wordt bepaald door de combinatie van de statische stijfheid en de dempingeigenschappen. Deze moet groot genoeg zijn om de trillingen onder een acceptabel niveau te houden. Gietijzer heeft betere dempingseigenschappen dan staal, maar de inwendige wrijving in las- en boutverbindingen absorbeert bij stalen frames zoveel energie dat het verschil verwaarloosbaar is. In de praktijk is de seriegrootte bepalend voor de keuze tussen staal en gietijzer. De beste demping verkrijgt men met frames uit polymeerbeton, beton waarin een kunsthars als bindmiddel fungeert.

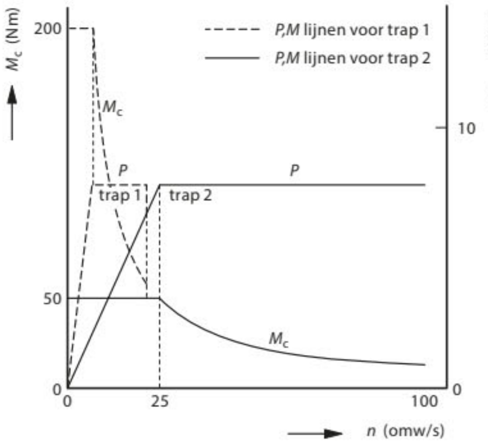
Bed

Het **bed** ondersteunt de geleidingen voor de slede en de losse kop. Bij de traditionele machines ligt het bed steeds in een horizontaal vlak. Het nadeel hiervan is dat hete spanen op het bed blijven liggen, waardoor de machine plaatselijk wordt opgewarmd en gaat vervormen. Bij automatisch werkende machines wordt het bed daarom vaak schuin of zelfs verticaal geplaatst. De rechtheid en spelingsvrijheid van de geleidingen hebben een grote invloed op de nauwkeurigheid van de machine. Bestendigheid tegen slijtage en minimale wrijving zijn van groot belang.

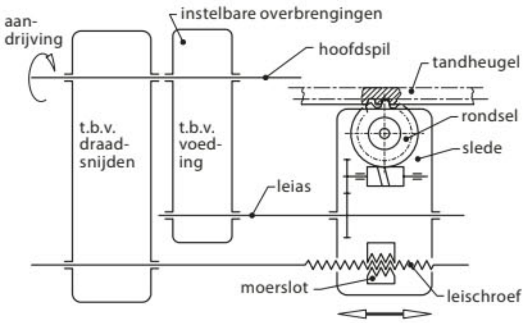
Vaste kop

De **vaste kop** bevat de **hoofdspil** en de aandrijving van de draaimachine. Rondloopnauwkeurigheid, evenwijdigheid aan het bed, buigstijfheid en afwezigheid van speling in de lagering van de hoofdspil zijn mede bepalend voor de nauwkeurigheid van de machine. De grote variatie in toerentallen en de betrekkelijk grote krachten maken het noodzakelijk de spil met wentellagers uit te rusten. Men kan spelingen elimineren door de lagers voor te spannen. Een grote buigstijfheid vraagt om een grote spildiameter. Deze wordt echter beperkt door de maximum toelaatbare omtreksnelheid in de lagers.
De aandrijving moet het vermogen en het moment (zie paragraaf 5.7.1) kunnen afgeven. Verder moet de aandrijving de zeer uiteenlopende toerentallen kunnen leveren. Het laagste toerental wordt bepaald door de laagst gewenste snijsnelheid en de grootste draaidiameter, het hoogste toerental wordt bepaald door de kleinste diameter (bijvoorbeeld $0{,}1 \times d_{max}$) en de hoogst gewenste snijsnelheid. Verschillende toerentallen kunnen getrapt of traploos worden ingesteld.

Bij de vroeger veelgebruikte **getrapte aandrijvingen** zijn voornamelijk tandwielkasten toegepast, soms in combinatie met **draaistroommotoren** met twee of drie toerentallen. Op deze wijze verkrijgt men aandrijvingen met bijvoorbeeld 16 of 24 verschillende toerentallen. Een gunstige verdeling bereikt men met een meetkundige reeks van toerentallen.
Met een **traploze aandrijving** is, binnen de uiterste grenzen, elk gewenst toerental te verkrijgen. Bovendien is hiermee een regeling mogelijk die de snijsnelheid constant houdt bij vlakdraaien of conisch draaien. Huidige machines zijn hiervoor



Figuur 5.41 Verloop van aandrijfmoment en vermogen met het toerental



Figuur 5.42 Aandrijving van de langsvoeding

meestal uitgerust met een draaistroommotor met **frequentieregeling**. Bij oudere machines treft men nog vaak **gelijkstroommotoren** aan. De aandrijving kent een maximum vermogen en moment. Bij lage toerentallen overheerst het maximum moment. Door een tandwielkast met twee overbrengingsverhoudingen kan de aandrijving over een groot toerenbereik het maximum vermogen leveren (zie figuur 5.41).

Op de vaste kop wordt een klauwplaat bevestigd waarmee het werkstuk geklemd wordt. Men onderscheidt klemmen met harde klauwen en klemmen met zachte klauwen, naargelang de vereiste nauwkeurigheid van het te verspanen werkstuk.

Sleden

Op gereedschapswerktuigen zijn **sleden** aanwezig om translatiebewegingen tussen het werkstuk en het gereedschap mogelijk te maken. Op een draaimachine beweegt de **langsslede** over het bed evenwijdig aan de hartlijn van de hoofdspil. Op de langsslede is de **dwarsslede** geplaatst. De **beitelslede** is draaibaar op de dwarsslede bevestigd. Door deze opbouw kan de **beitelhouder** bewegen in een vlak door de hartlijn. Door de beitelslede schuin te stellen kan de beitelpunt ook een schuine baan beschrijven.

Bij handmatig bediende machines wordt de voedingsbeweging afgeleid van de rotatie van de hoofdspil. Er zijn twee gescheiden aandrijfsystemen aanwezig: een systeem voor het snijden van schroefdraad en een systeem voor het langs- en vlakdraaien. Schroefdraadsnijden vraagt om betrekkelijk grote waarden van de voeding en om een zeer hoge nauwkeurigheid. Bij de overige bewerkingen zijn de voedingssnelheden betrekkelijk klein, maar de optredende krachten groter.

Voor schroefdraadsnijden dient een leischroef met een deelbare moer, het moerslot. Voor de andere bewerkingen dient een tandwielmechanisme en een tandheugel aan het frame, aangedreven door de lei-as. De twee aandrijfsystemen zijn elk via een eigen tandwielkast met de hoofdspil gekoppeld. Figuur 5.42 toont beide mechanismen. Het aantal mogelijke waarden voor de spoed van schroefdraad is zo groot dat het niet mogelijk is al deze waarden met een tandwielkast te verkrijgen. Dit wordt bij de handbediende machine opgelost door het toepassen van losse tandwielen (zogeheten wisselwielen). Bij de huidige numeriek bestuurde machines kan de besturing elke gewenste spoed leveren.

Losse kop

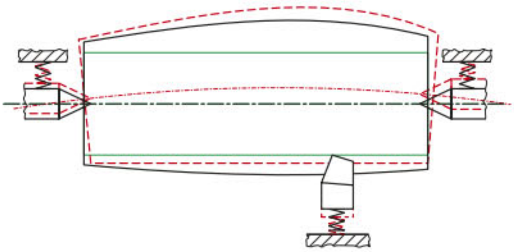
De **losse kop** heeft twee functies:
- het ondersteunen van lange werkstukken met behulp van een center. Volgens een vuistregel is dit nodig bij een verhouding tussen lengte en diameter van meer dan 4;
- het boren van concentrische gaten. Het center kan worden vervangen door een boorhouder. De voedingsbeweging voor het boren gebeurt bij de meeste machines met handkracht.

Lange en slanke stukken kunnen verder nog ondersteund worden door een bril die tussen de vaste en de losse kop gemonteerd wordt.
Bij numeriek bestuurde machines wordt de aandrij-

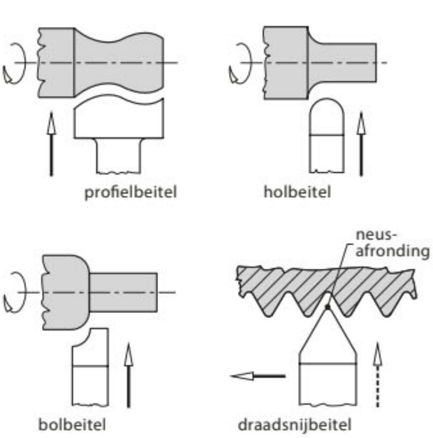
ving van de vaste kop en alle overige sledes aangedreven door motoren die gecontroleerd worden door de numerieke besturing (zie ook hoofdstuk 13).

5.7.4 Bepaling van de instelgrootheden bij het voordraaien

Het doel van **voordraaien** is het zo snel mogelijk verwijderen van overtollig materiaal. **Nadraaien** dient om de gevraagde nauwkeurigheid en oppervlakteruwheid te bereiken.
De gereedschapsfabrikant geeft meestal instelgrootheden op zoals snijsnelheid, voedingssnelheid en snedediepte. Op basis van deze gegevens dient men na te gaan of het nodige vermogen beschikbaar is. Bij de bepaling van het beschikbaar vermogen dient men rekening te houden met het rendement van de aandrijvingen. Dit bedraagt meestal 0,75-0,8. Evenzeer van belang zijn begrenzingen door de stijfheid van de machine, de opspanning en het werkstuk (zie figuur 5.43).



Figuur 5.43 Doorbuigen van een elastisch werkstuk door geringe stijfheid van de opspanning (centers en beitel)



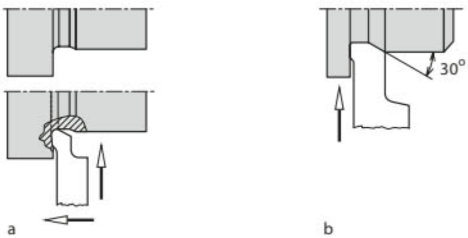
Figuur 5.44 Draaien met profielbeitels

5.7.5 Bewerkingsmogelijkheden

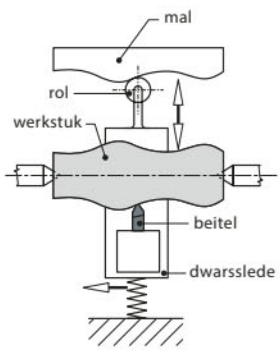
Met de langs- en dwarsslede kan de beitelpunt cilindrische vlakken en vlakken loodrecht op de hartlijn genereren. Tijdens het snijden van schroefdraad zorgt het voedingsmechanisme voor een vaste koppeling tussen hoofdspil en beitelpunt.

Omwentelingslichamen kunnen verder nog worden begrensd door schuine lijnen, cirkelbogen en willekeurige contouren. Dit is in beperkte mate te realiseren met behulp van **profielbeitels** (zie figuur 5.44). Hier is sprake van het reproduceren van de vorm. Deze werkwijze is dus vooral geschikt voor grote productaantallen of voor standaard constructiedetails zoals een draaduitloopgroef (zie figuur 5.45b). In alle andere gevallen is het nodig de beitelpunt de gewenste vorm te laten beschrijven.

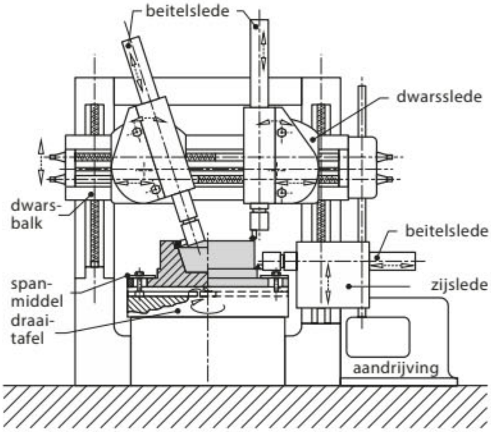
Bij de handbediende machine gebruikt men hiervoor een **kopieerinrichting**. Tot op heden vindt men dit nog terug binnen de houtbewerking. In zijn eenvoudigste vorm is dit de kopieerinrichting van figuur 5.46. De vorm van het product is vastgelegd



Figuur 5.45 Ondersnijding (a) en draaduitloopgroef (b)



Figuur 5.46 Kopieerinrichting



Figuur 5.47 Carrouseldraaimachine

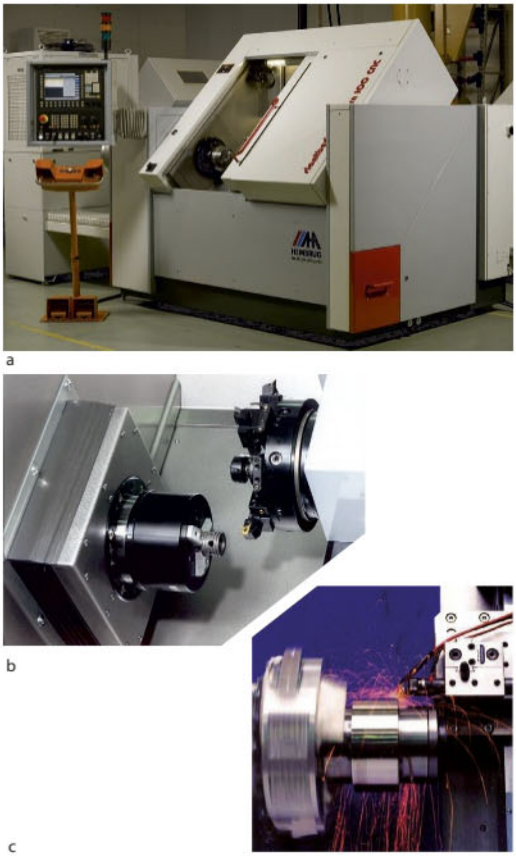
in een kopieermal. Een taster stuurt de instelbeweging van de beitel met behulp van een elektrisch of hydraulisch servosysteem.

Uitgezonderd de enkele toepassingen binnen de houtbewerking, is de wijze van produceren met kopieerinrichting volledig vervangen door elektronische informatieverwerking. Men spreekt dan van numeriek bestuurde of NC-machines (NC staat voor *numerical control*). Numerieke besturing maakt het ook gemakkelijker machines te construeren die draaibewerkingen kunnen combineren met andere bewerkingen, zoals het boren loodrecht op of naast de hartlijn en het frezen. Een machine met deze mogelijkheden staat bekend als een **draaicentrum**. Deze onderwerpen behandelen we in hoofdstuk 13.

5.7.6 Enkele bijzondere draaimachines

De **carrouseldraaimachine** is een draaimachine waarvan de hoofdspil om een verticale as roteert (zie figuur 5.47). De machine bezit een horizontale spantafel met een grote diameter. De slede is opgehangen aan een verticale kolom of een portaal. De machine is speciaal bestemd voor schijfvormige of ringvormige producten met een grote diameter. De carrouseldraaimachine heeft als voordeel dat het spannen op een horizontale draaitafel gemakkelijker is uit te voeren. Voor zeer grote diameters, (3-15 m) is de carrouseldraaimachine de enige mogelijkheid. Bij dergelijke machines bevindt de draaitafel zich vaak ter hoogte van de werkplaatsvloer.

De draaimachine in figuur 5.48 is bestemd voor uiterst nauwkeurige draaibewerkingen met PCBN


a
b
c

Figuur 5.48 Mikroturn-draaimachine (a), klauwplaat en gereedschapturret in detail (b) en hoogprecisie-harddraaien zonder koelvloeistof (c) (Hembrug)

en diamantbeitels (zie paragraaf 5.4). Om aan de zeer hoge eisen op het gebied van oppervlaktekwaliteit en nauwkeurigheid te voldoen, is de machine voorzien van **hydrostatische lagers**, (zie figuur 13.27) en van een besturing met een scheidend vermogen van 0,01 μm en een **repeteernauwkeurigheid** van 0,02 μm. Dit levert een veel betere kwaliteit dan de werkwijze die wordt toegepast in de figuren 14.6 en 14.7.

5.8 Gatbewerkingen

Bij gatbewerkingen maakt het gereedschap een roterende hoofdbeweging; de voedingsbeweging vindt plaats evenwijdig aan de richting van de rotatieas van de hoofdbeweging. Bij concentrisch boren op een draaimachine roteert uiteraard het werkstuk.

Tot de gatbewerkingen behoren boren, kotteren, ruimen en het snijden (bij gatbewerkingen ook 'tappen' genoemd) van schroefdraad. Verreweg de belangrijkste hiervan is het **boren**, de meest voorkomende bewerking in de metaalindustrie; de overige bewerkingen zijn voornamelijk nabewerkingen (zie paragraaf 5.8.3).

5.8.1 Boren

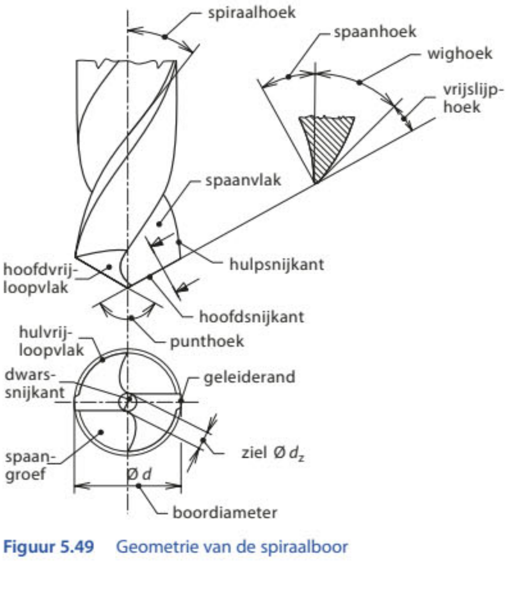
Bij het boren kan onderscheid gemaakt worden tussen:

- **volboren**, hierbij wordt al het materiaal in het gat verspaand;
- **kernboren**, hierbij blijft een massieve kern in het midden van het gat over (zie figuur 5.61b). Er hoeft dus minder materiaal te worden verspaand;
- **opboren**, hierbij wordt de diameter van een bestaand gat vergroot.

Wanneer men zonder nadere aanduiding over boren spreekt, bedoelt men volboren.

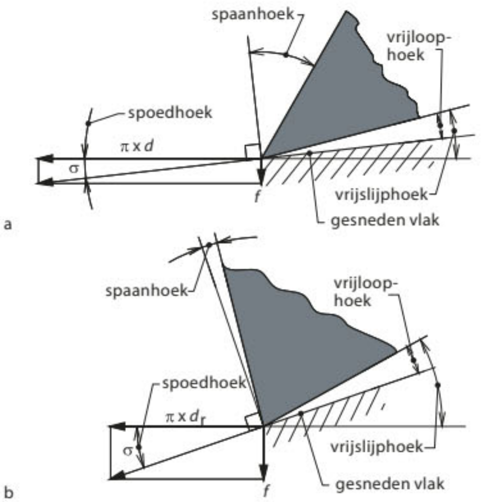
Technologie

In figuur 5.49 zie je de geometrie van een **spiraalboor**. De beide **hoofdsnijkanten** zijn te vergelijken met twee tegenover elkaar geplaatste boorbeitels (zie figuur 5.38). De snijkanten moeten tot de hartlijn van het gat reiken. Om de twee boorbeitels met elkaar tot één geheel te verbinden zijn de snijkanten verschoven ten opzichte van de hartlijn. Hierdoor ontstaat de **ziel** van de boor. De beide vrijloopvlakken van de boorpunt snijden elkaar en vormen zo de **dwarssnijkant**. Om te voorkomen dat de hele omtrek van de boor langs de gatwand wrijft, is hij voorzien van **geleideranden**; de rest van de omtrek heeft een kleinere diameter.

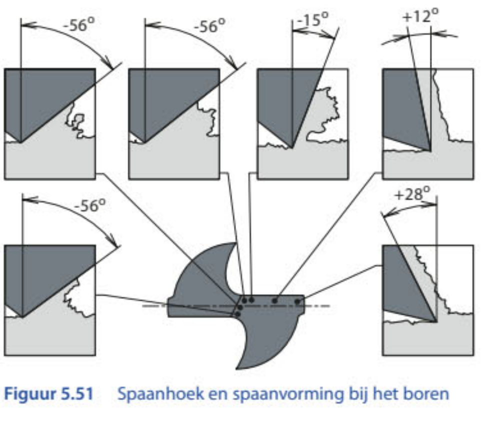


Figuur 5.49 Geometrie van de spiraalboor

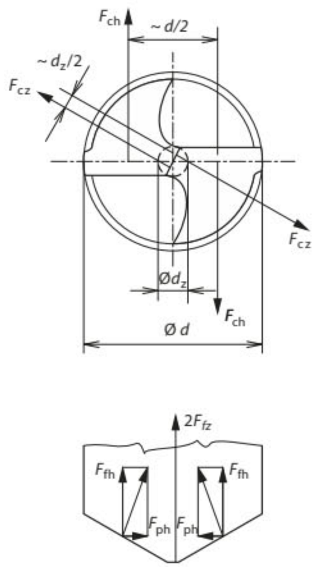
De spaanhoek ontstaat door de spiraalvorm van de boor. Aan de omtrek van de boor is de spaanhoek gelijk aan de **spiraalhoek**. De **vrijslijphoek** ontstaat bij het slijpen van de boorpunt. Door de gecombineerde rotatie- en voedingsbeweging zijn de werkspaanhoek en de vrijloophoek niet gelijk aan de spiraalhoek en de vrijslijphoek (zie figuur 5.50). De bewegingsrichting van de snijkant staat niet loodrecht op de hartlijn van de boor. Aan de omtrek



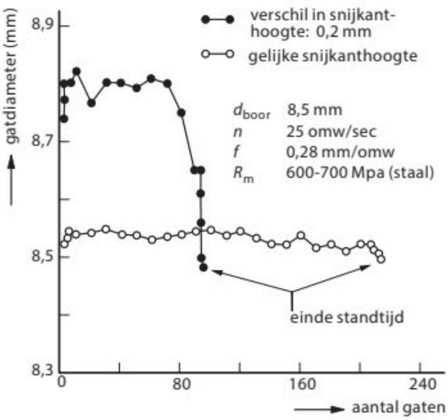
Figuur 5.50 De werkhoeken van de snijwig bij het boren aan de omtrek (a) en dicht bij de ziel (b)



Figuur 5.51 Spaanhoek en spaanvorming bij het boren



Figuur 5.52 De optredende krachten bij het boren



Figuur 5.53 Gevolgen van asymmetrisch geslepen boorpunt

is deze afwijking, de **spoedhoek** σ, klein. Deze neemt echter toe tot 90° in het hart van de boor. De hoek σ volgt uit:

$$\tan\sigma = \frac{f}{\pi \times d_r}$$

waarin f de voeding en d_r de plaatselijke diameter is. Dit betekent dat de vrijslijphoek in de richting van de hartlijn moet toenemen. Deze hoek moet zo groot zijn dat bij de grootste optredende voeding nog een positieve vrijloophoek overblijft. Bij standaardboren voor staal is de spiraalhoek 30°, de vrijslijphoek loopt op van 5° aan de omtrek tot 15° bij de ziel van de boor.

Bij de dwarssnijkant ontstaat onvermijdelijk een zeer grote wighoek, de **punthoek**. Bij de standaardspiraalboor is deze ε=118°. Door deze grote wighoek en de ter plaatse grote spoedhoek ontstaat hier een zeer sterk negatieve spaanhoek (zie figuur 5.51). De verspaningscondities zijn dus zeer ongunstig. Dit verklaart de grootte van de krachten die op de boorpunt werken in figuur 5.52. De dwarssnijkant veroorzaakt ongeveer de helft van de totale voedingskracht. Door de korte arm (circa $d_z/2$) is de bijdrage van de dwarssnijkant aan het boormoment slechts ongeveer 10%. De slijtage van de dwarssnijkant bepaalt vaak de gebruiksduur van de boor.

Er zijn verschillende methoden ontwikkeld om ter plaatse van de ziel extra materiaal weg te slijpen, het **aanpunten** van de boor. Hiermee wordt een kortere dwarssnijkant verkregen en/of een minder negatieve spaanhoek. Op deze wijze kan men de voedingskracht aanzienlijk beperken, de standtijd van de boor verhogen en soms ook de **centreernauwkeurigheid** van de boor verbeteren.

Wanneer de beide hoofdsnijkanten niet zuiver symmetrisch zijn aangebracht, krijgt een van beide de grootste snededoorsnede te verwerken. De horizontale componenten F_{ph} zullen elkaar dan niet in evenwicht houden; de boor zal uitwijken en een te groot gat met een slechte oppervlaktekwaliteit veroorzaken. Bovendien loopt de standtijd van de boor sterk terug (zie figuur 5.53). Het slijpen van een boorpunt is een gecompliceerde bewerking, die alleen goed is uit te voeren met speciale borenslijpmachines.

Voedingskracht, aandrijfmoment en -vermogen

Voor de voedingskracht en het verspaningsmoment geldt:

$$F_f = C_f \times d^{x_f} \times f^{y_f}$$

$$M_c = C_M \times d^{x_M} \times f^{y_M}$$

Hierin is d de boordiameter en f de voeding, beide in mm. De constanten en exponenten zijn afhankelijk van de boorgeometrie en het werkstukmateriaal. Ze zijn experimenteel bepaald. Enkele richtwaarden voor het boren in constructiestaal zijn: $C_f \approx 1500$, $x_f \approx 0{,}8$, $y_f \approx 0{,}8$, $C_M \approx 0{,}45$, $x_M \approx 1{,}8$, $y_M \approx 0{,}8$. Hieraan is te zien dat de krachten bij een toenemende snededoor-

snede minder dan recht evenredig toenemen met de voeding en de boordiameter, net als bij het draaien. Het verspaningsvermogen volgt uit:

$$P_c = M_c \times \omega = M_c \times 2 \times \pi \times n$$

Hierin is ω de hoeksnelheid en n het toerental.

Keuze van de voeding

De voeding wordt meestal bepaald door het maximum toelaatbare torsiemoment op de ziel van de boor. Het breukmoment van de boor volgt uit:

$$M_b = C_b \times d^{x_\omega}$$

waarin C_b en x_ω constanten zijn, afhankelijk van het materiaal en de geometrie van de boor. Als richtwaarde voor x_ω geldt 2,6.

De voeding wordt zodanig gekozen dat:

$$M_c = \alpha \times M_b$$

waarin α een veiligheidscoëfficiënt is (α < l).

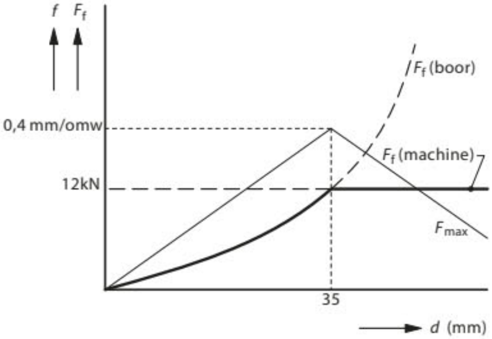
Door het gelijkstellen van het optredende moment en het maximum toelaatbare moment kan bij de gegeven richtwaarden voor de exponenten worden afgeleid dat de maximum toelaatbare voeding ongeveer recht evenredig met de diameter is, dus:

$$f_{max} = C^* \times d$$

waarin C^* een constante is, afhankelijk van het type boor en het werkstukmateriaal.

Naast het toelaatbaar torsiemoment op de boor gelden er nog andere beperkende factoren bij de keuze van de voeding. Dit kunnen zijn:
- de vrijslijphoek van de boor;
- de spaanafvoer;
- de boormachine;
- het werkstuk;
- de opspanning van het werkstuk.

De boormachine vervormt elastisch als gevolg van de voedingskracht. Hierdoor verloopt het boorgat enigszins in plaats en richting. Het grootste probleem treedt echter op bij het uittreden van de boorpunt aan de achterzijde van het werkstuk. Op dat moment neemt de voedingskracht plotseling met circa 50% af, waardoor de machine terugveert. Dit heeft een plotselinge toename van de voeding tot gevolg, en dus van het boormoment. Dit verschijnsel staat bekend als het 'happen' van de boor,



Figuur 5.54 Begrenzing van de voeding en de voedingskracht met de boordiameter

wat boorbreuk kan veroorzaken. Voor elke boormachine geldt daarom een maximum toelaatbare voedingskracht. Deze hangt af van de stijfheid van de machine.

In figuur 5.54 hebben we de voeding en de voedingskracht uitgezet als functie van de boordiameter. Bij het bereiken van de maximum toelaatbare waarde van de voedingskracht F_f moet de voeding afnemen om de kracht constant te houden. De voor het boren benodigde tijd neemt toe. Het is dan beter om een stijvere machine in te zetten.

Ook het maximale aandrijfmoment of -vermogen van de machine kan bepalend zijn voor de voeding. Verder kunnen de stijfheid van het werkstuk of zijn opspanning een begrenzing voor de voedingskracht betekenen.

Keuze van de snijsnelheid

De snijsnelheid is bepalend voor de standtijd van de boor. Bij het boren is het de gewoonte in plaats van de standtijd de standlengte L te hanteren. Dit is de totale lengte van de gaten die gedurende de standtijd zijn geboord. Een gebruikelijke richtwaarde voor L bedraagt 1000 mm bij een boordiameter van 10 mm en 8000 mm en bij een diameter van 50 mm. De optimale snijsnelheid neemt af als de verhouding l_g/d toeneemt, waarin l_g de gatdiepte is. Bij diepe gaten leveren de afvoer van spanen en de warmte problemen op.

De tabel in figuur 5.55 geeft richtwaarden voor het boren in verschillende werkstukmaterialen. Deze gelden voor $l_g/d \le 2$.

Werkstukmateriaal		Spiraalhoek (°)	Punthoek (°)	v_c (m/s)	$C^* = \frac{f_{max}}{d}$
ongelegeerd staal	R_m<700 MPa	20-30	118	0,4-0,7	0,008
ongelegeerd staal	700MPa≤R_m≤900MPa	20-30	118	0,15-0,3	–
roestvast staal	R_m>900 MPa	20-30	130	0,1-0,15	0,01
harde staalsoorten		10	130	0,05-0,1	0,005
perlitisch gietijzer		18-25	118	0,25-0,3	0,02
messing		12	118	0,8-1,7	0,025
Al-legering (langspanig), koper		30-40	140	0,8-2	0,032
Al-legering (kortspanig)		20-30	140	0,5-0,8	0,04
kunststoffen (zacht)		30-40	140	0,8-1,7	–
kunststoffen (hard)		12	80	0,25-0,6	–

Figuur 5.55 Richtwaarden voor het boren met snelstalen spiraalboren

Rekenvoorbeeld:

Je beschikt over de volgende gegevens:

d = 25 mm = 0,025 m
v_c = 0,5 m/s
C^* = 0,008

Verder gelden de eerdergenoemde richtwaarden voor constanten en exponenten.

Bereken: f_{max} (begrensd door boor), F_f, M_c, n, P_c.

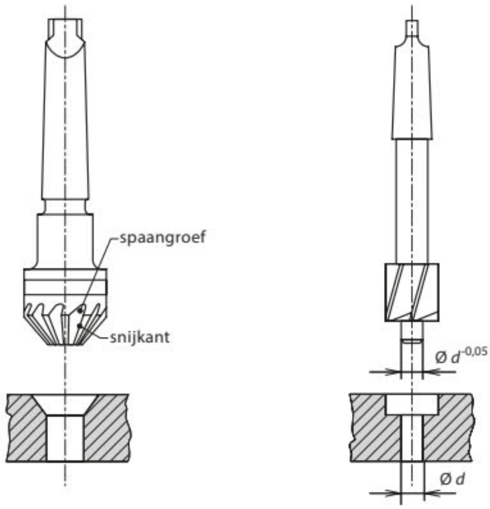
Oplossing:

$$f_{max} = 0{,}008 \times 25 = 0{,}2 \text{ mm/omw}$$

$$F_f = 1500 \times 25^{0,8} \times 0{,}2^{0,8} = 5436 \text{ N}$$

$$M_c = 0{,}45 \times 25^{1,8} \times 0{,}2^{0,8} = 40{,}8 \text{ Nm}$$

$$P_c = 40{,}8 \times 2 \times \pi \times 6{,}37 = 1632 \text{ W} = 1{,}632 \text{ kW}$$



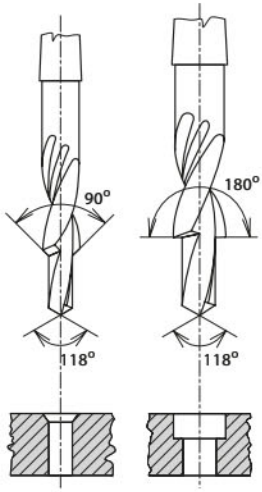
Figuur 5.56 Verzinkboren

Spaanbeheersing

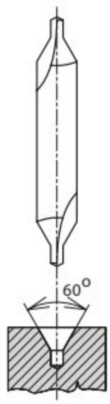
Bij diepere gaten is het moeilijker de spanen af te voeren. Het kan dan nodig zijn, het gereedschap regelmatig terug te trekken (*peck drill*) of een kleinere voeding te kiezen dan bepaald wordt door de boor of de machine. Dit resulteert in kleinere spanen, die zich gemakkelijker laten afvoeren.

Bijzondere typen boren

Voor gaten met een rechte of schuine verzinking bestaan speciaal gevormde boren: **verzinkboren** en **getrapte boren** (zie de figuren 5.56 en 5.57). **Centerboren** (zie figuur 5.58), dienen voor het boren van centergaten ten behoeve van het spannen



Figuur 5.57 Getrapte boren



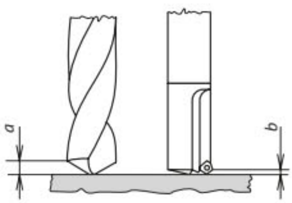
Figuur 5.58 Centerboor

tussen centers (zie figuur 14.8) of voor het verhogen van de centreernauwkeurigheid van spiraalboren. Dit is noodzakelijk bij een nauwe tolerantie op de positie van gaten.

Voor diameters vanaf circa 12 mm bestaan boren die voorzien zijn van hardmetalen wisselplaten (zie figuur 5.59). Hiermee is een veel hogere snijsnelheid mogelijk. Door de grote punthoek is de te boren lengte korter; vooral bij een kleine waarde van l_g/d levert dit een belangrijke tijdwinst op (zie figuur 5.60). Dergelijke boren zijn vaak voorzien van inwendige koelkanalen voor het onder hoge druk aanvoeren van koelvloeistof. Naast koelen heeft de koelvloeistof nog een functie: het meevoeren van de spanen. Voor gatdiameters kleiner dan 12 mm bestaan boren die geheel uit hardmetaal zijn vervaardigd.

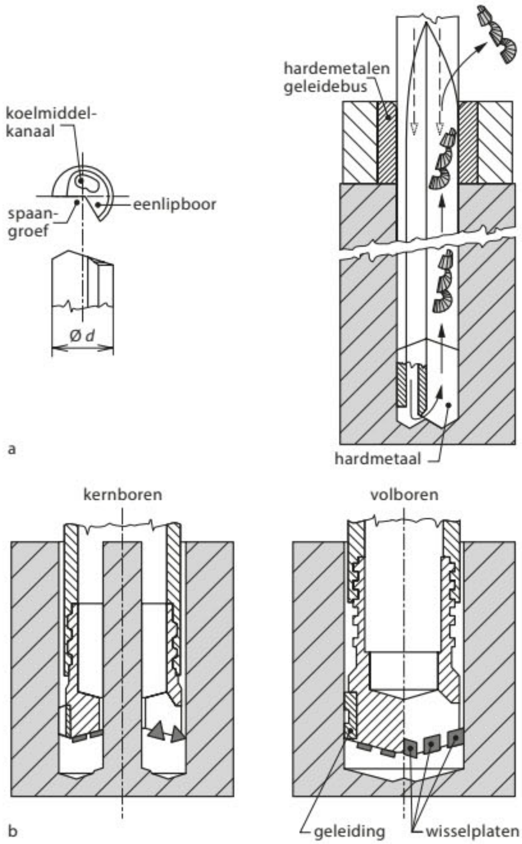


Figuur 5.59 Boren met hardmetalen wisselplaten en koelkanalen (Sandvik-Coromant)



a	(mm)	12	-
b	(mm	-	2
v_c	(m/)	0,4	4,4
v_f	(mm/s)	0,8	8,4
per product:			
boortijd t_c	(s)	94	4

Figuur 5.60 Tijdbesparing met hardmetalen boren voor korte gaten ($l_g/d < 3$)



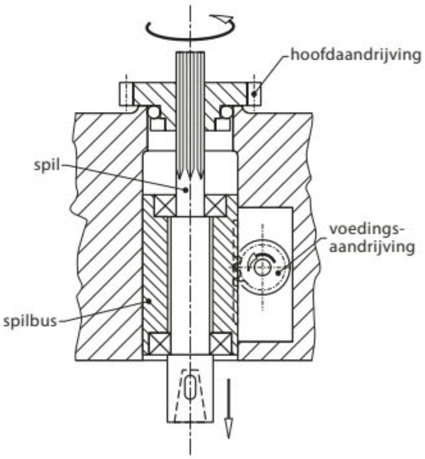
Figuur 5.61 Eenlipboor (a) voor $d \leq 30$ mm en langgat-wisselplaatboren (b) voor $d > 30$mm

De genoemde wisselplaatboren en massieve boren uit hardmetaal worden tegenwoordig op kostbare bewerkingscentra (zie paragraaf 13.6.2) het meest gebruikt.

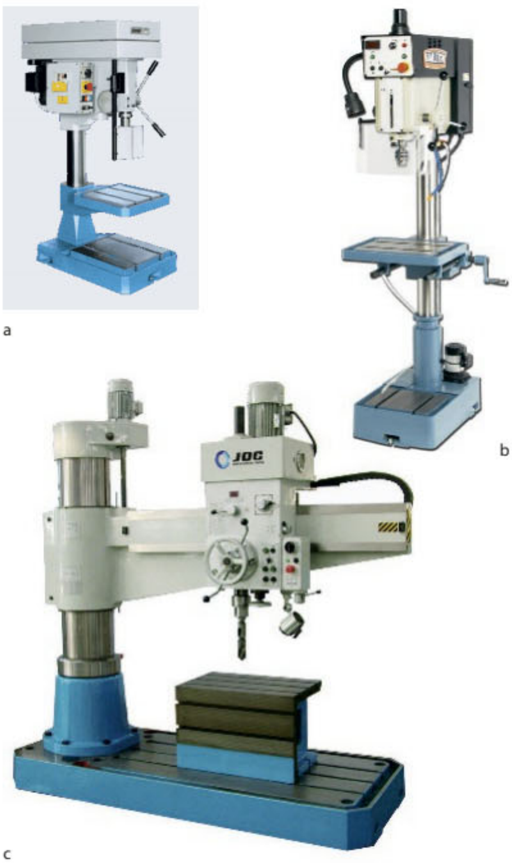
Een bijzondere techniek is **langgatboren**, het boren van gaten met een zeer hoge waarde van l_g/d. Hiervoor bestaan verschillende speciale boortypen. Je ziet hiervan twee voorbeelden in figuur 5.61. Op deze wijze zijn, op speciaal daarvoor ingerichte machines, verhoudingen $l_g/d > 100$ te bereiken.

5.8.2 Boormachines

Zoals we al zeiden, werkt de voedingskracht in de richting van de rotatieas. Dit leidt tot een spilconstructie zoals in figuur 5.62. Deze constructie vinden we in alle oudere typen boormachines terug. Een nadeel ervan is de betrekkelijk grote zijdelingse speling van de spilbus. Daardoor is deze niet



Figuur 5.62 Spilconstructie van een boormachine



a

b

c

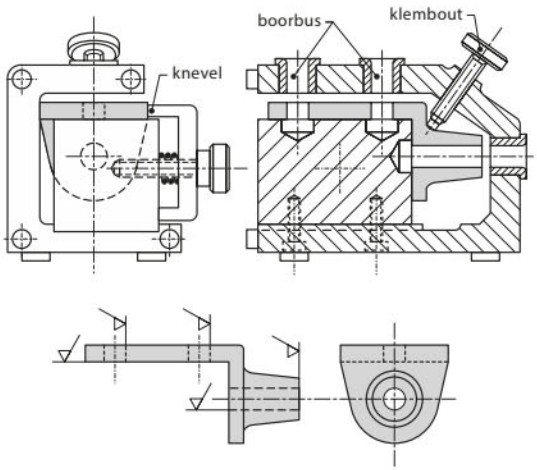
Figuur 5.63 Tafelboormachine (BIMAK) (a), kolomboormachine (Baileigh) (b) en radiaalboormachine (JOC) (c)

geschikt voor de moderne boren met hardmetalen wisselplaten.

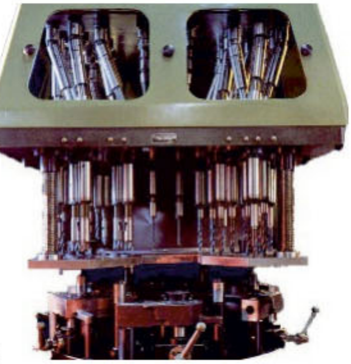
De meest gangbare typen boormachine zijn, van klein naar groot, de **tafelboormachine**, de **kolomboormachine** en de **radiaalboormachine**. Je ziet ze in de figuren 5.63a, b en c. Nauwkeurig **positioneren** is met deze machines moeilijk. Vaak is het nodig om een **boormal** toe te passen (zie figuur 5.64).

Bij veel producten moet een groot aantal evenwijdige gaten geboord worden. Denk bijvoorbeeld aan een deksel dat met bouten wordt vastgezet. Bij middelgrote en grote aantallen producten is het dan zinvol een **meerspillige boormachine** in te zetten (zie figuur 5.65a).
Een centrale aandrijving verzorgt de rotatie van een aantal spillen. Een productgebonden plaat aan de onderzijde van de spilkop heeft een gatenpatroon dat de positie van de boren bepaalt.
Voor grote series kunnen boorkoppen met een vast gatenpatroon worden toegepast. Een dergelijke boorkop zie je in figuur 5.65b.

Veel producten moeten overigens zowel boor- als freesbewerkingen ondergaan. Door de ontwikkeling van het bewerkingscentrum, dat beide processen kan uitvoeren, verliest de standaard boormachine aan betekenis. Bewerkingscentra behandelen we in hoofdstuk 13.

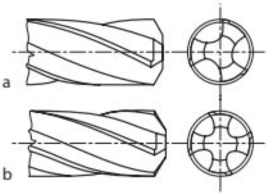


Figuur 5.64 Boormal met werkstuk

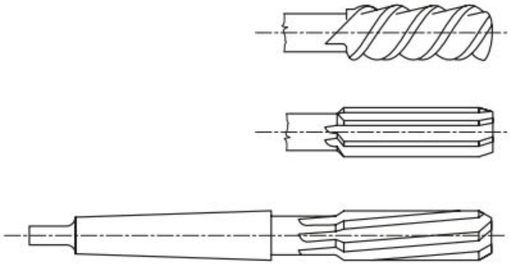
a


b

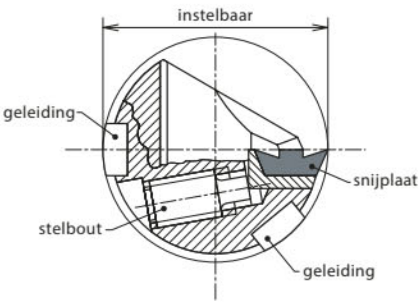

Figuur 5.65 Deel van een meerspillige boormachine (a) (Technisch Adviesbureau Bannink) en een meerspillige boor - en tapkop (b) (MPA)

a
b


Figuur 5.66 Drielippenboor (a) en vierlippenboor (b)



Figuur 5.67 Ruimers



Figuur 5.68 Enkelsnedige ruimer

5.8.3 Overige gatbewerkingen

Boren met een spiraalboor levert gaten met een matige nauwkeurigheid en oppervlaktekwaliteit. Voor betere resultaten zijn één of meer nabewerkingen nodig, uitgaande van een **ondermaats** geboord gat (kleiner dan de uiteindelijke diameter). We bespreken hier naboren, ruimen, kotteren en het snijden of tappen van schroefdraad.

Naboren

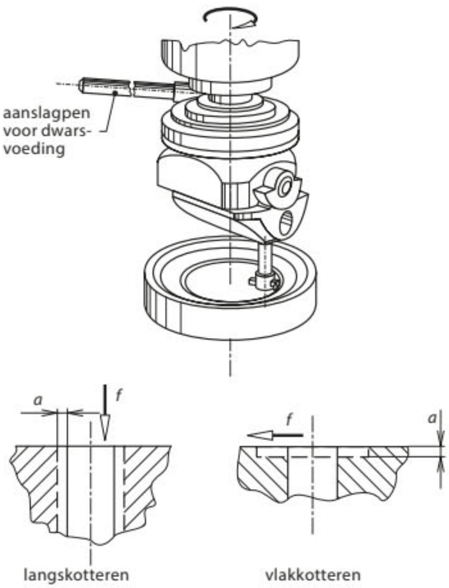
Drielippenboren en **vierlippenboren** worden beter geleid door de gatwand en leveren daardoor een hogere kwaliteit en vooral een betere rondheid van het gat (zie figuur 5.66).

Ruimen

Ruimen wordt gebruikt om gaten met hoge precisie (nauwkeurige vormtoleranties, bijvoorbeeld H7) te bewerken. De **ruimer** is een gereedschap met een groot aantal snijkanten om een goede geleiding in het gat te verkrijgen. Ruimers bestaan in verschillende uitvoeringen. Enkele voorbeelden hebben we weergegeven in figuur 5.67. De beste kwaliteit wordt bereikt met **enkelsnedige** ruimers (zie figuur 5.68).

Kotteren

Kotteren is te beschouwen als inwendig draaien waarbij niet het werkstuk, maar het gereedschap roteert. De **kotterbeitel** die in de **kotterkop** wordt opgenomen (zie figuur 5.69), kan op een vaste diameter worden ingesteld en dan een axiale voedingsbeweging maken, het **langskotteren**. Ook is het mogelijk de kotterbeitel een radiale voedingsbeweging te laten maken voor het **vlakkotteren**. Met kotteren is het ook mogelijk de plaatsnauwkeurigheid van het gat te verbeteren, iets wat niet kan met naboren en ruimen.



Figuur 5.69 Kotterkop met bewerkingsmogelijkheden

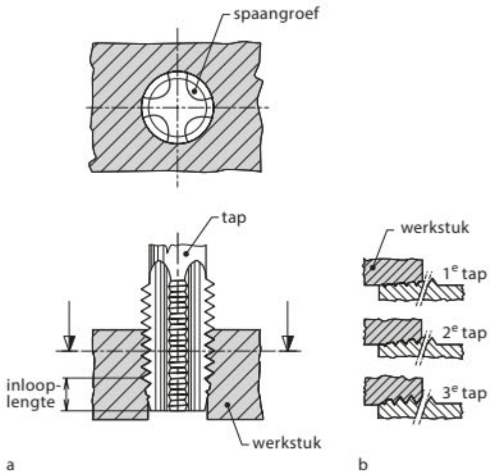
Het snijden van schroefdraad

Uitwendige schroefdraad kan worden vervaardigd door draaien, snijden met een **snijplaat** (zie figuur 5.70) of door **draadrollen** (zie paragraaf 4.4.1, figuur 4.11).
Inwendige schroefdraad kan, behalve door draaien (bij betrekkelijk grote diameters), worden vervaardigd door **tappen**. Een **tap** is een snijgereedschap voor één bepaalde schroefdraad. Voor tappen met de hand gebruikt men opeenvolgende tappen waarmee in drie stappen de juiste diepte van de draad bereikt kan worden (zie figuur 5.71). De **machinetap** kan de schroefdraad in één stap op de juiste diepte snijden.

Inwendige en uitwendige schroefdraad kan ook worden gemaakt door middel van schroefdraadfrezen (zie paragraaf 5.9.3). Met één type frees kan een reeks schroefdraden met verschillende diameters snel en nauwkeurig worden vervaardigd.



Figuur 5.70 Snijplaat



Figuur 5.71 Draadtappen

5.9 Frezen

Bij **frezen** maakt het gereedschap een roterende hoofdbeweging. De voedingsbeweging staat, loodrecht op de rotatieas van de frees, in tegenstelling tot bij boren (zie figuur 5.28).
De frees wordt dus zijdelings belast door de voedingskracht. De lagering van de hoofdspil moet hierop berekend zijn.
Met frezen kan een grote verscheidenheid aan vormen worden verkregen. Er bestaan dan ook veel verschillende freesgereedschappen en -machines. Het aantal snijkanten, de **tanden** van de frees, loopt uiteen van één (uitzonderlijk) tot vele tientallen.

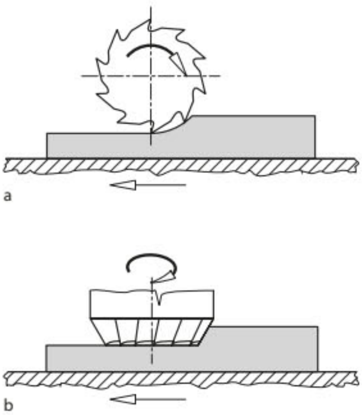
5.9.1 Technologie

Het frezen kent twee varianten, **mantelfrezen** en **kopfrezen**. Bij mantelfrezen loopt de rotatieas van de frees evenwijdig aan het bewerkte vlak, bij het kopfrezen staat deze daar loodrecht op (zie figuur 5.72). Bij het frezen volgens figuur 5.73 is zowel sprake van mantel- als van kopfrezen. Een daarvoor geschikte frees heet dan ook **mantelkopfrees**. Bij mantelfrezen is er een belangrijk onderscheid tussen **tegenloopfrezen** en **meeloopfrezen**. Figuur 5.74 maakt het verschil duidelijk: in het aanrakingspunt is de snijsnelheid v_c van de frees tegengesteld aan de voedingssnelheid v_f van het werkstuk of in dezelfde richting.
Bij kopfrezen treedt tegelijkertijd tegen- en meeloopfrezen op, waardoor dit onderscheid hier van

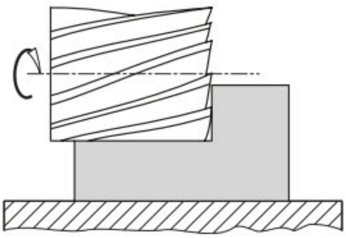
weinig belang is (zie figuur 5.75). Figuur 5.76 laat zien dat ook een kopfrees hoofdzakelijk aan de omtrek snijdt. De voeding per tand is gewoonlijk veel kleiner dan de snedediepte. De snijkant aan de kopse kant fungeert als **hulpsnijkant**.

Figuur 5.77 geeft de geometrie van een mantelfrees met de belangrijkste benamingen en hoeken. In figuur 5.78 zie je een mantelfrees bij tegenloopfrezen.

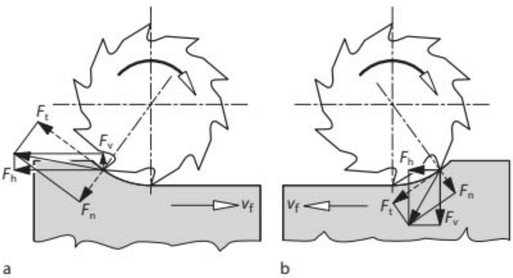
Bepalend voor de spaanvorming zijn de snedediepte a, de **voeding** per tand f_z en de diameter d van de frees. Elke tand verwijdert een hoeveelheid materiaal, zoals aangegeven door de grijze doorsnede in figuur 5.78. De dikte varieert dus steeds tussen 0 en



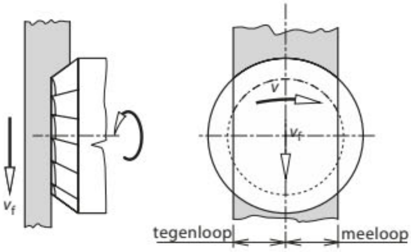
Figuur 5.72 Mantelfrezen (a) en kopfrezen (b)



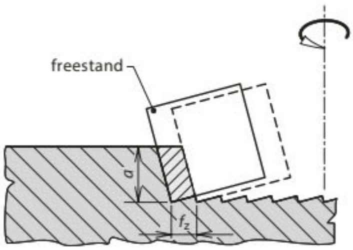
Figuur 5.73 Mantelkopfrezen



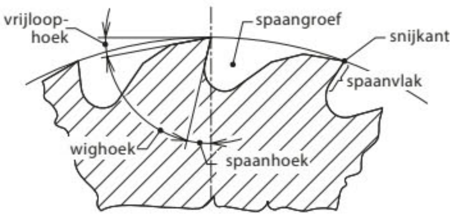
Figuur 5.74 Tegenloopfrezen (a) en meeloopfrezen (b)



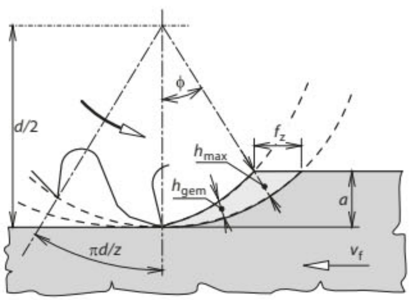
Figuur 5.75 Tegen- en meeloopfrezen bij kopfrezen



Figuur 5.76 Snededoorsnede bij kopfrezen



Figuur 5.77 Geometrie van de mantelfrees



Figuur 5.78 Spaanvorm bij tegenloopfrezen met een mantelfrees

het maximum h_{max}. Om de snijkracht op één tand te berekenen maakt men gebruik van de gemiddelde snededikte h_{gem}. Voor $a/d \leq 0{,}2$ geldt in goede benadering:

$$h_{gem} = f_z \times \sqrt{\frac{a}{d}}$$

De **ingrijphoek** ϕ volgt uit:

$$\cos\phi = \frac{\frac{d}{2} - a}{\frac{d}{2}}$$

Het aantal tanden z_i dat tegelijkertijd aan het snijden is bedraagt:

$$z_i = \frac{\phi}{360^\circ} \times z$$

Hierin is z het aantal tanden van de frees.
De gemiddelde snijkracht per tand is recht evenredig met de snedebreedte b (loodrecht op het vlak van de tekening in figuur 5.78). De specifieke snijkracht varieert met h_{gem}. Overeenkomstig met het draaien (zie paragraaf 5.7.1), gaan we weer uit van $k_{c1.1}$.

Voor de gemiddelde tangentiële snijkracht geldt dan:

$$F_c = k_{c1.1} \times h_{gem}^{(1-\varepsilon)} \times b \times z_i$$

Het benodigd verspaningsmoment is:

$$M_c = F_c \times \frac{d}{2}$$

Het verspaningsvermogen bedraagt:

$$P_c = F_c \times v_c \times z_i = M_c \times \omega$$

Hierin is v_c de snijsnelheid. Het toerental van de frees is:

$$n = \frac{v_c}{\pi \times d}$$

Het verspaand volume per tijdseenheid is:

$$Q = a \times b \times f_z \times n \times z$$

Merk op dat $f_z \times n \times z$ gelijk is aan de op de machine in te stellen voedingssnelheid v_f.

Rekenvoorbeeld over mantelfrezen:

Je beschikt over de volgende gegevens.

a = 5 mm
b = 50 mm
f_z = 0,2 mm
d = 40 mm = 0,04 m
$k_{c1.1}$ = 1500 MPa
ε = 0,21
z = 6
v_c = 0,6 m/s

Bereken: h_{gem}, ϕ, z_i, F_c, M_c, P_c, n, Q, v_f.

Oplossing:

$$F_c = 1500 \times 0{,}07^{(1-0{,}21)} \times 50 \times 0{,}69 = 6332 \text{ N}$$

$$P_c = 6332 \times 0{,}6 = 3799 \text{ W} = 3{,}8 \text{ kW}$$

$$Q = 5 \times 50 \times 0{,}2 \times 4{,}77 \times 6 = 1431 \text{ mm}^3/\text{s}$$

$$v_f = 0{,}2 \times 6 \times 4{,}77 = 5{,}7 \text{ mm/s}$$

In het algemeen wordt de bereikte oppervlakteruwheid beïnvloed door dezelfde parameters als bij het draaien. Men spreekt van een kinematische ruwheid en een procesruwheid.

Meeloop- of tegenloopfrezen?

In figuur 5.74 hebben we snijkrachten aangegeven die op een bepaald tijdstip optreden. Je ziet dat bij meeloopfrezen de horizontale component van de snijkracht F_h dezelfde richting heeft als de voeding. Bij tegenloopfrezen is deze tegengesteld gericht.
Bij meeloopfrezen trekt de frees het product als het ware onder zich door. Speling in de aandrijving van de spantafel kan ertoe leiden dat de voeding per tand plotseling toeneemt. Dit kan freesbreuk veroorzaken. Dan kan meeloopfrezen niet worden toegepast. Bij de nieuwere machines is de aandrijving uitgevoerd met **spelingcompensatie**, een constructie die ervoor zorgt dat dit probleem niet kan optreden.
De verticale component F_v van de snijkracht is bij meeloopfrezen neerwaarts, dus van de frees af. Bij tegenloopfrezen is deze opwaarts, dus naar de frees toe gericht. Bij tegenloopfrezen verloopt de spaan van dun naar dik, bij meeloopfrezen van dik naar dun.
De gevolgen hiervan hebben we in figuur 5.82 aangegeven.

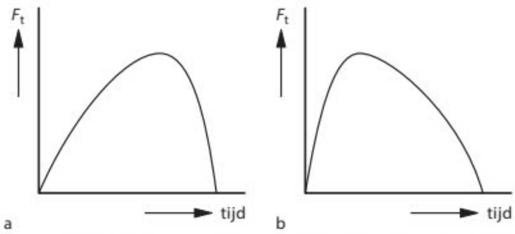
Traditionele machines zonder spelingcompensatie dwingen tot tegenloopfrezen. Bij moderne, spelingvrije machines heeft meeloopfrezen vaak de voorkeur.

5.9.2 Freesgereedschappen

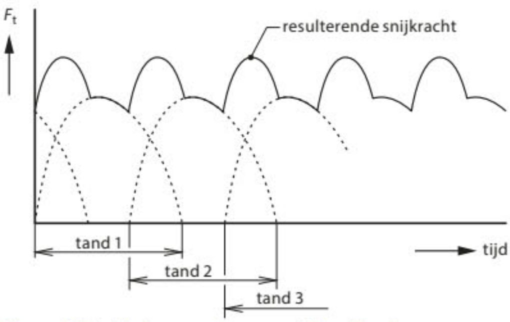
Mantel- en mantelkopfrezen

De tandvorm van een mantelfrees en de diverse benamingen hebben we weergegeven in figuur 5.77. Van belang is de grootte van de spaangroef. Deze moet ruimte genoeg hebben om de spaan te kunnen bergen gedurende het doorlopen van de ingrijpboog. Het komt nogal eens voor dat de spaangroef de snedediepte en snededoorsnede van de snede beperkt. Bij werkstukmaterialen die lange spanen vormen, zoals aluminium, kiest men frezen met ver uit elkaar staande tanden, bij het frezen van gietijzer dienen de tanden van de frees juist dicht bij elkaar te staan. Hetzelfde geldt bij een lange respectievelijk een korte ingrijpboog.
Figuur 5.79 geeft het krachtverloop op een snijdende tand weer bij tegenfrezen en meeloopfrezen. Bij een klein aantal tegelijk snijdende tanden, dus een kleine waarde van z_i en ϕ, leidt dit tot sterke variaties van de snijkracht. De tanden zijn daarom meestal spiraalvormig op de omtrek aangebracht. Dit resulteert in een meer gelijkmatig krachtverloop. Vergelijk de figuren 5.80 en 5.81. Er moet nu wel rekening worden gehouden met het optreden van een axiale component van de snijkracht.

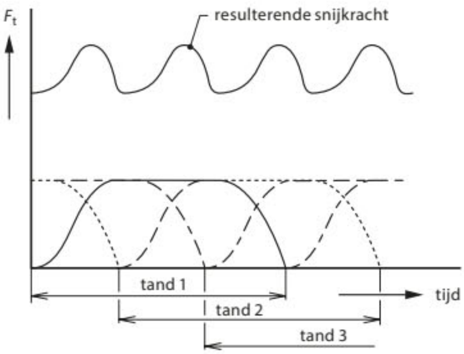
Aangezien frezen in het algemeen een complexe vorm hebben, werden ze vroeger meestal in snelstaal uitgevoerd. Tegenwoordig worden frezen overwegend uitgevoerd met hardmetalen gesoldeerde snijkanten of wisselplaten. Bij kleinere afmetingen worden ze zelfs massief uit hardmetaal vervaardigd. Voorbeelden van verschillende frezen en hun



Figuur 5.79 Verloop van de tangentiële snijkracht per tand bij tegenloopfrezen (a) en meeloopfrezen (b)



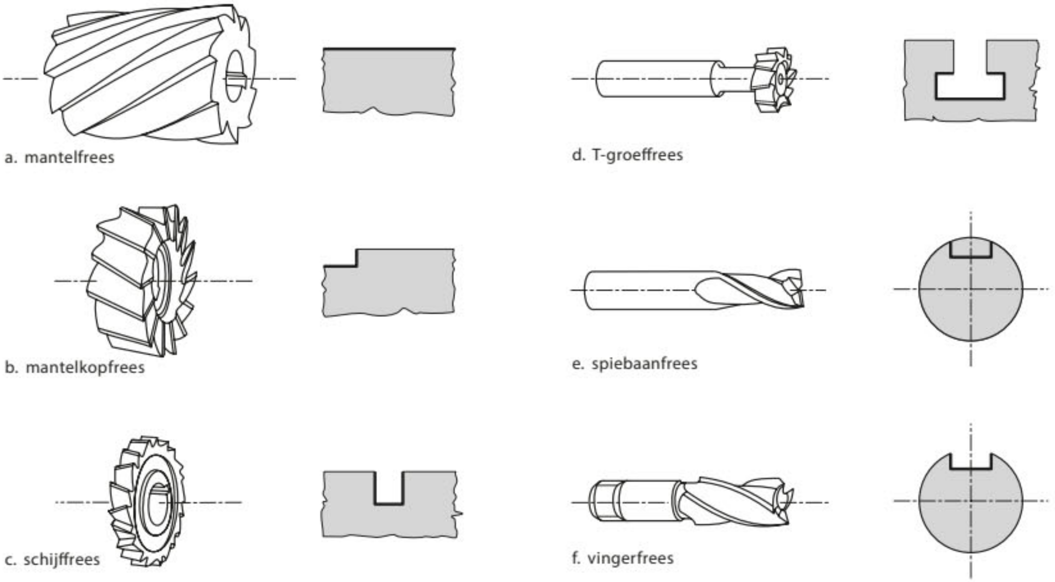
Figuur 5.80 Verloop van de tangentiële snijkracht voor een frees met rechte tanden



Figuur 5.81 Verloop van de tangentiële snijkracht voor een frees met spiraalvormige tanden

Kenmerken	Tegenloopfrezen	Meeloopfrezen
aandrijving voeding:	F_h drukt werkstuk weg van frees	F_h trekt werkstuk naar frees toe
	geen spelingscompensatie nodig	spelingcompensatie onmisbaar
spaanvorming:	dun → dik	dik → dun
snijkracht:	stijgt geleidelijk	stijgt sneller
snijgedrag:	eerst wrijven, later snijden	meteen snijden
oppervlaktekwaliteit:	matig	goed
opspanning:	F_v beurtelings vanaf en naar werkstuk gericht: klapperen!	F_v drukt werkstuk weg
nauwkeurigheid:	te veel materiaal verwijderd	te weinig materiaal verwijderd

Figuur 5.82 Vergelijking van meelopend en tegenlopend frezen



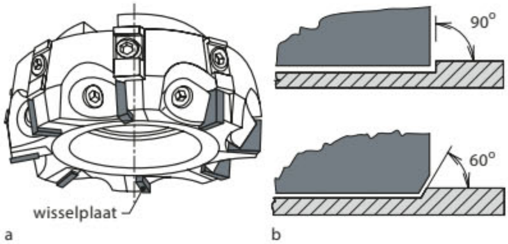
Figuur 5.83 Verschillende typen frezen met hun snijprofiel

toepassing zie je in figuur 5.83. Merk op dat de spiebaanfrees, in tegenstelling tot de vingerfrees, een boorbewerking kan uitvoeren; één van de snijkanten loopt door tot voorbij de hartlijn van de frees.

De toepassing van mantelfrezen betreft voornamelijk het bewerken van groeven en profielen (dit hebben we ook aangegeven in figuren 5.83a en b). De lage gemiddelde, en bovendien steeds wisselende, snededikte veroorzaakt betrekkelijk hoge en sterk wisselende krachten. Daardoor ontstaan trillingen die de haalbare nauwkeurigheid en ruwheid ongunstig beïnvloeden.
Door de vorm van de hiervoor toegepaste frezen is het maar in beperkte mate mogelijk om hardmetalen snijkanten toe te passen. Voor platte vlakken is het daarom beter kopfrezen toe te passen.

Kopfrezen

Kopfrezen zijn gewoonlijk uitgevoerd met hardmetalen of keramische wisselplaten. Men spreekt dan van **meskopfrezen** (zie figuur 5.84). Het freeslichaam en de snijplaten zijn zo uitgevoerd dat bij het vervangen van versleten platen de **rondloopnauwkeurigheid** en **vlakloopnauwkeurigheid** behouden blijven. De grote (soms zelfs zeer grote) diameter van deze frezen vereist machineaandrijvingen met lage toerentallen en een hoog aandrijfmoment.



Figuur 5.84 Meskopfrees (a) en details met snijkanthoek van 90° en 60° (b)

Bolfrezen

Bolfrezen (zie figuur 5.85) worden vooral gebruikt voor het nabewerken van complex gevormde onderdelen (zie figuur 5.86). Het gebruik van computergestuurde machines, aangestuurd via CAD/CAM, is hierbij noodzakelijk. Door de bolvorm ontstaat een freesribhoogte. Deze kan worden beperkt door de freesbanen of freestracks dicht bij elkaar te leggen.

Om slechte verspaningscondites (snijsnelheid ≈0) te vermijden is het voordelig de bolfrees te hellen (niet loodrecht op het oppervlak) zodat de snijsnelheid bepaald wordt door de zijkant van de bolfrees. Om dit te bereiken is veelal een multi-assig gestuurde freesmachine noodzakelijk. Vijfassige freesmachines met drie translatie-assen en twee rotatie-assen zijn gebruikelijk (zie hoofdstuk 13).



a b

Figuur 5.85 Bolkopfrees, van snelstaal (a), met hardmetalen wisselplaten (b) (Sandvik Coromant)



Figuur 5.86 Frezen van een complex gevormd matrijsonderdeel door middel van numeriek bestuurd frezen met een bolkopfrees die hier noodzakelijk is voor het hellende deel van de bovenkant van het werkstuk (Shutterstock/Pixel B)

5.9.3 Freesmachines

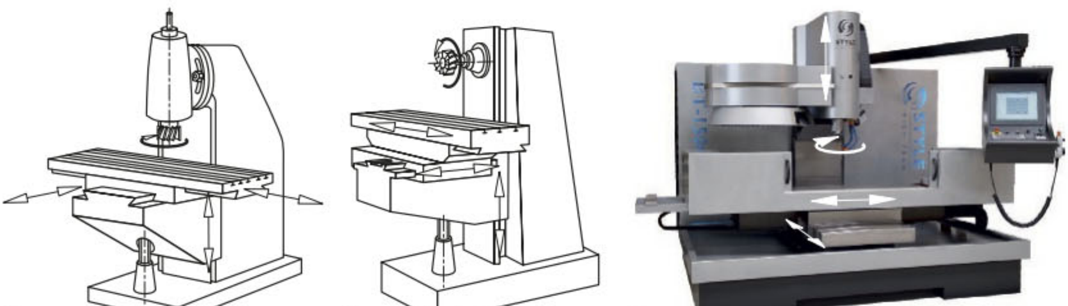
De traditionele handbediende machines hebben als gezamenlijk kenmerk dat de spil alleen roteert en het werkstuk de instel- en voedingsbewegingen maakt. Dit resulteert in de opbouw van de horizontale en verticale freesmachines in de figuren 5.87a en b. De horizontale machine kan complexe profielen frezen door het combineren van een aantal frezen op de spil (zie figuur 5.88).

Bij moderne, vooral numeriek bestuurde, machines is het principe van de vast opgestelde spil vaak verlaten. In plaats daarvan komen allerlei combinaties van spil- en tafelbewegingen voor (zie figuur 5.87c). Verdere bewegingsmogelijkheden, zoals draaitafels en rotaties van de spil-as, behandelen we in hoofdstuk 13. Hetzelfde geldt voor de bewerkingscentra, die de mogelijkheden van boormachines en freesmachines in zich verenigen.

Circulair frezen

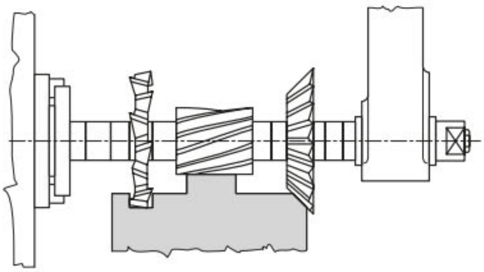
Een zeer nuttige uitbreiding van de bewerkingsmogelijkheden ontstond toen men gebruik ging maken van circulaire interpolatie op numeriek bestuurde freesmachines en bewerkingscentra (zie hoofdstuk 13). De hartlijn van een frees wordt hierbij langs een circulaire baan gestuurd (zie figuur 5.89). Men noemt dit **circulair frezen**.

Met een frees van een bepaalde diameter kunnen snel en nauwkeurig een groot aantal verschillende diameters van het werkstuk worden gerealiseerd. Men past hiervoor de diameter van de gereedschapsbaan aan. Door een combinatie van de circulaire voedingsbeweging $v_{f,t}$ met de axiale voedingsbeweging $v_{f,a}$ kunnen relatief lange cilinders verkregen worden. Men spreekt dan van freesdraaien bij uitwendige bewerkingen of van freesboren bij gatbewerkingen. Met een profielfrees kunnen bijzondere werkstukvormen worden geproduceerd. Als een frees van een schroefdraadprofiel is voorzien, kan een schroefdraad worden gefreesd, zoals we al

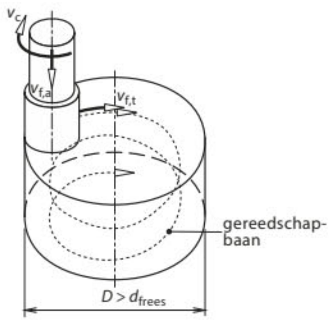


a b c

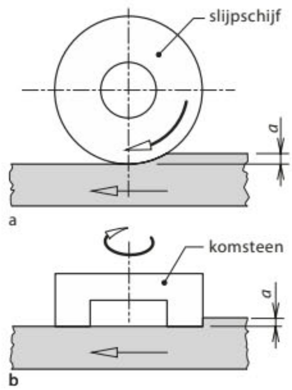
Figuur 5.87 Diverse configuraties van freesmachines: verticale (a), horizontale (b), en vlakfreesmachine (c, Style High Tech)



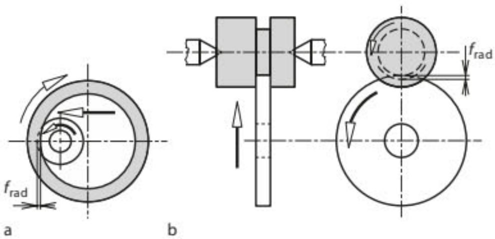
Figuur 5.88 Gecombineerd frezen



Figuur 5.89 Circulair frezen van een gat met diameter *D*



Figuur 5.90 Vlakslijpen met slijpschijf (a) en komsteen (b)



Figuur 5.91 Insteek rondslijpen: inwendig (a) en uitwendig (b)

aangaven in paragraaf 5.8.3. Hiervoor is een nauwkeurige schroeflijn nodig, dus een nauwkeurige coördinatie van de circulaire en de axiale voedingsbeweging.

5.10 Slijpen

Een **slijpschijf** is te beschouwen als een frees met een zeer groot aantal ongedefinieerde snijkanten. In analogie met frezen kennen we slijpschijven met de rotatieas evenwijdig aan het bewerkte vlak en komschijven met de rotatieas loodrecht op het bewerkte vlak (zie figuur 5.90). De geometrische opzet van **vlakslijpen** is enigszins te vergelijken met die van de freesbewerkingen. Ook kunnen omwentelingslichamen met een slijpschijf bewerkt worden. Deze bewerking, **rondslijpen**, is enigszins te vergelijken met draaien. De hoofdbeweging is nu echter de rotatie van de slijpschijf; de draaibeweging van het werkstuk is een voedingsbeweging (zie figuur 5.91). De snijsnelheid bij het slijpen is veel hoger dan bij de processen die we hiervoor hebben behandeld. Een gebruikelijke waarde bij het slijpen van staal is bijvoorbeeld 30-60 m/s.

De snijkanten van de slijpschijf bestaan uit willekeurig gevormde slijpkorrels. De spaanhoek is altijd sterk negatief. De doorsnede van de afzonderlijke sneden is klein of zelfs zeer klein. Dit is afhankelijk van de korrelgrootte. Om de korrel te laten snijden, is een grote normaalkracht tussen korrel en werkstukoppervlak nodig. Dit veroorzaakt hoge wrijvingskrachten. Hierdoor is de specifieke snijkracht bij slijpen ten minste een factor 10 hoger dan bij draaien of frezen. Het verspaand volume per tijdseenheid is meestal laag. Slijpen is een kostbare bewerking.

Er kunnen verschillende redenen zijn om frezen of draaien toch te vervangen door vlak- of rondslijpen, ondanks de hogere kosten:
- de vereiste nauwkeurigheid;
- de vereiste oppervlaktekwaliteit;
- een grote hardheid van het werkstuk;
- lage toelaatbare bewerkingskrachten;
- een geringe dikte van de te verwijderen laag.

In de loop der tijd zijn de draai- en freesprocessen behoorlijk verbeterd. Daarnaast stelt men steeds hogere eisen aan producten. Dit heeft gevolgen voor het toepassingsgebied van het slijpen: men stelt

er steeds hogere kwaliteitseisen aan en er worden hardere materialen gebruikt.

5.10.1 Technologie

In figuur 5.92 zie je een gedeelte van een slijpschijf. De afgebeelde elementen, de slijpkorrels, het bindmiddel en de poriën bepalen de eigenschappen van de schijf.
De belangrijkste variabelen zijn:
- het materiaal van de slijpkorrels;
- de grootte van de slijpkorrels;
- de hardheid van de schijf;
- de structuur van de schijf;
- de aard van het bindmiddel.

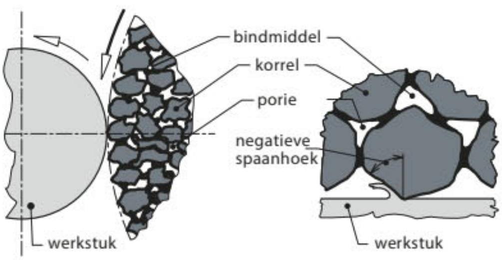
Voor de gangbare slijpmaterialen gebruikt men een aanduiding met cijfers en letters. Figuur 5.93 geeft de aanduiding van conventionele slijpschijven volgens Norton.

Korrelmateriaal

De meest toegepaste conventionele slijpmiddelen zijn **aluminiumoxide** (**korund**) en **siliciumcarbide**. Daarnaast worden de zeer slijtvaste slijpmiddelen **boriumcarbide**, polykristallijn kubisch boriumnitride (PCBN) en diamant toegepast. We hebben deze materialen op volgorde van hardheid gezet; de korrels van elk volgend materiaal zijn steeds harder en brosser. Bij een hard werkstukmateriaal kiest men een harde korrel.

Korrelgrootte

De **korrelgrootte** is van belang voor de bereikbare ruwheid en afnamesnelheid. Naarmate de korrel kleiner is, zullen de oppervlakteruwheid en de afnamesnelheid dalen. De korrelgrootte wordt aangeduid met een getal dat overeenkomt met de maaswijdte van de zeef waarop de korrel nog net blijft liggen. Deze maaswijdte wordt aangeduid met het aantal mazen per inch van de zeef. Een hoog getal geeft dus een fijne korrel aan. Voor korrels fijner dan 120 is dit een fictief getal, omdat het sorteren dan gebeurt door **slibben**, waarbij men de korrels laat bezinken. Bij kleinere korrels duurt dit langer.



Figuur 5.92 Doorsnede van een slijpschijf

38A 46 H 8 V BE

Korrelmateriaal

Alundum (normaalkorund)	=	A
19-Alundum (halfkorund)	=	19A
38-Alundum (edelkorund)	=	38A
37-Chrystolon (siliciumcarbide, donker)	=	37C
39-Chrystolon (siliciumcarbide, groen)	=	39C

Korrelgrootte

grof	middel	fijn	zeer fijn
10	30	70	220
12	36	80	240
14	46	90	320
16	50	100	400
20	60	120	500
24		150	600
		180	

Hardheidsgraad

zacht	middel	hard
D	I M	Q V
E	J N	R W
F	K O	S X
G	L P	T Y
H	U Z	

Structuur

dicht	middel	open
0	4	7
1	5	8
2	6	9
3		10
		11
		12

Bindmiddel

Keramisch	=V
Silicaat	=S
Kunsthars	=B
Rubber	=R
Schellak	=E

Bijzondere uitvoering van de binding

Keramische bindingssoorten:
zonder aanduiding=normaal
BE, BA, A, K=speciale binding

P (nabewerkt)=poreuze binding

Kunsthars bindingen:
zonder aanduiding=normaal
H, 2, 5, 7, 18=speciale bindingen

Figuur 5.93 Indeling en aanduidingen van conventionele slijpschijven volgens Norton

Hardheid

De werking van het slijpproces is gebaseerd op het principe dat bot geworden slijpkorrels door de toenemende snijkracht uit het oppervlak van de steen wegbreken. Daardoor komen er steeds weer scherpe korrels vrij om hun taak over te nemen. Onder de hardheid van de schijf verstaat men de sterkte van de binding van de korrels in de schijf. Een harde schijf zal de korrels lang vasthouden. Bij een betrekkelijk zacht werkstukmateriaal is dit toelaatbaar; hard werkstukmateriaal mag alleen met zeer scherpe korrels worden bewerkt. Je zou het misschien niet verwachten, maar bij hard werkstukmateriaal hoort dus een zachte steen en omgekeerd. Dit betekent dat bij hard werkstukmateriaal de schijf snel zal slijten. Een maat hiervoor is de **slijpverhouding** *G*:

$$G = \frac{volume\ geslepen\ werkstukmateriaal}{volume\ verbruikt\ slijpschijfmateriaal}$$

Een lage waarde van G duidt op een sterke slijtage van de slijpschijf. Bij de meest voorkomende slijpbewerkingen varieert G van 1 tot 100; in bijzondere gevallen komen waarden van 0,1 voor, maar ook van 10.000.
De hardheid wordt aangeduid met een letter; een letter verderop in het alfabet duidt op een grotere hardheid.

Structuur

Het begrip **structuur** slaat op de grootte van de poriën. De poriën dienen als spaangroef. Deze moet voldoende ruimte bieden om de spanen te bergen in de tijd dat de schijf in aanraking is met het werkstuk. Bij een grove korrel en een grote contactlengte hoort een open structuur. De **contactlengte** is de lengte van de baan die de korrel aflegt over het werkstukoppervlak. De structuur wordt aangeduid met een getal, van 0 (zeer dicht) tot 12 (zeer open).

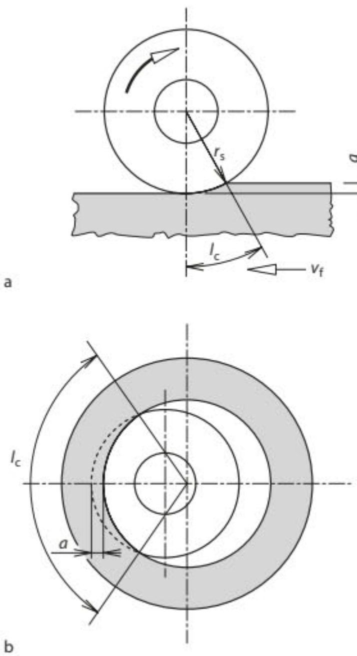
Bindmiddel

Als bindmiddel worden verschillende materialen toegepast. De **keramische binding**, aangeduid met V (van *vitrified*), wordt het meest gebruikt. Dit bindmiddel bestaat uit klei die na drogen bij hoge temperatuur wordt gebakken. Door het variëren van de samenstelling van de klei en van de baktemperatuur zijn de hardheid en de structuur van de schijf te beïnvloeden. Bij de **silicaatbinding** (aangeduid met S) berust de binding op een chemische reactie: de vorming van waterglas. Bij grote en ingewikkeld gevormde schijven geeft dit minder kans op kromtrekken en scheurvorming. De hardheid en dichtheid van de schijf zijn betrekkelijk hoog. Dit maakt de silicaatbinding speciaal geschikt voor schijven bestemd voor **profielslijpen**. Bij een zachte schijf zou het nodig zijn de vorm van de schijf zeer vaak te corrigeren. **Elastische bindingen**, bestaande uit kunsthars (B), rubber (R) of schellak (E), zijn goed bestand tegen zijdelingse belastingen. Dit maakt ze met name geschikt voor smalle doorslijpschijven. Bij slijpschijven met PCBN en diamantkorrels komt ook **metaalbinding** voor.

Door het variëren van al deze factoren kan men slijpschijven verkrijgen met zeer veel verschillende eigenschappen. Er is veel deskundigheid nodig om de juiste slijpschijf te kunnen kiezen.

Contactlengte

Toen we de structuur van de schijf bespraken, hadden we het al over de contactlengte. De contactlengte l_c is mede bepalend voor de keuze van de structuur van de slijpschijf (zie figuur 5.94). Een



Figuur 5.94 Contactlengte bij vlakslijpen (a) en bij inwendig rondslijpen (b)

toename van de contactlengte vraagt om een grotere spaanruimte en dus om een meer open structuur. De verhouding tussen de snedediepte en de radius van de slijpschijf, a/r_s, is bij het slijpen altijd zeer klein. Daaruit is af te leiden dat voor vlakslijpen geldt:

$$l_c = \sqrt{2 \times a \times r_s}$$

Bij uitwendig rondslijpen is de contactlengte relatief klein. Bij inwendig rondslijpen kan l_c echter zeer groot worden wanneer de diameter van de slijpschijf die van de te slijpen boring nadert (zie figuur 5.94b). Ook bij vlakslijpen met een komsteen kan een grote contactlengte optreden.

Het is de gewoonte bij het slijpen de verschillende grootheden te bepalen per eenheid van de actieve breedte van de schijf. Voor het verspaand volume per tijdseenheid per eenheid van actieve schijfbreedte Q' levert dit:

$$Q' = a \times v_w$$

Hierin is v_w de snelheid waarmee het werkstuk onder de schijf wordt doorgevoerd.

De specifieke snijkracht bij slijpen is, zoals we eerder al vermeldden, ten minste tienmaal hoger dan bij frezen of draaien. Men rekent bij het slijpen gewoonlijk met de **specifieke energie** p_c, de energie die nodig is voor het verspanen van een volume-eenheid materiaal.
Het benodigde snijvermogen P_c, bij een slijpbreedte b, is te berekenen met:

$$P_c = Q' \times p_c \times b$$

Rekenvoorbeeld:

Je beschikt over de volgende gegevens:

v_w = 0,3 m/s = 300 mm/s
a = 0,02 mm
b = 50 mm
p_c = 35 J/mm³.

Bereken: Q', Q, P_c.

Oplossing:

$$Q' = 0{,}02 \times 300 = 6 \text{ mm}^3/\text{s}/\text{mm}$$

$$Q = 6 \times 50 = 300 \text{ mm}^3/\text{s}$$

$$P_c = 6 \times 35 \times 50 = 10500 \text{ W} = 10{,}5 \text{ kW}$$

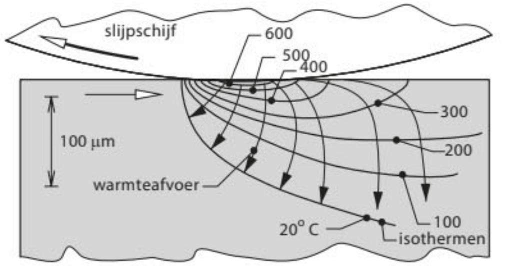
Vergelijk de berekende waarden met die uit het rekenvoorbeeld voor het frezen (zie paragraaf 5.9.1).

Slijptemperatuur

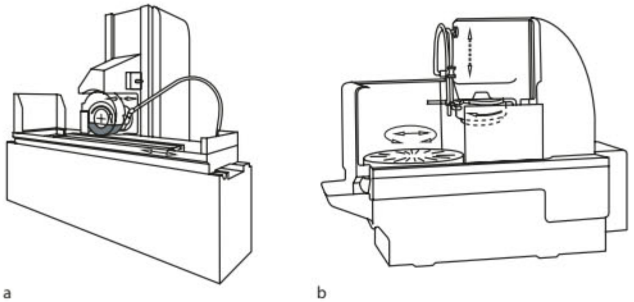
Een groot deel van de bij het slijpen verbruikte energie (gemiddeld 70%) wordt als warmte naar het werkstuk afgevoerd. Dit leidt tot hoge temperaturen aan het werkstukoppervlak. Deze hoge temperaturen kunnen structuurveranderingen of zelfs oppervlaktescheuren en vervormingen van het werkstuk veroorzaken. De temperatuur van de spanen bereikt de verbrandingstemperatuur van ijzer, 1150 °C. Dit kun je zien aan de vonken die bij het slijpen zichtbaar zijn. Figuur 5.95 geeft de temperatuurverdeling aan het werkstukoppervlak bij een slijpbewerking. Het koelen dient primair voor het voorkomen van een te hoge temperatuur van het werkstuk. Dit vindt meestal plaats met behulp van een water-olie-emulsie (zie paragraaf 5.13). Zonder bijzondere maatregelen, zoals het toevoeren van koelmiddel vanuit de spil door de poreuze slijpschijf, is de vloeistof niet in staat de slijpzone zelf te bereiken. Dit is vaak nodig om de wrijvingskrachten te beperken. Het bevordert de warmteafvoer uit de slijpzone en verlaagt daardoor zeer effectief de temperatuur van het werkstukoppervlak.

Dressen/richten van slijpschijven

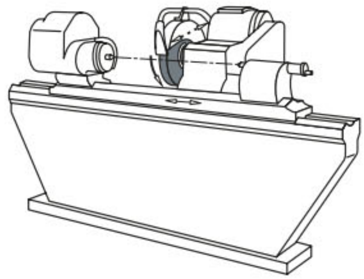
Slijtage van het slijpwiel kan bijgestuurd worden door het zogenaamd dressen of richten van het slijpwiel. Dit kun je vergelijken met het herslijpen van een draaibeitel. Dressen gebeurt veelal op de slijpmachine zelf, door de slijpsteen te 'verspanen' met een diamantgereedschap. Zeker bij vormgereedschappen (slijpwielen met een specifiek aangebrachte vorm) dient het dressen regelmatig te gebeuren. Dressen heeft als gevolg dat het slijpwiel kleiner wordt. De kleinere diameter dient dan via de machine-instellingen bijgestuurd te worden.



Figuur 5.95 Temperatuurverdeling bij het slijpen



Figuur 5.96 Horizontale (a) en verticale (b) slijpmachine



Figuur 5.97 Rondslijpmachine

5.10.2 Slijpmachines

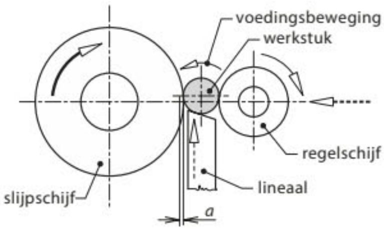
Een slijpschijf heeft een grote massa en is nooit volkomen homogeen. Gecombineerd met de hoge optredende toerentallen veroorzaakt dit onbalans en dus trillingen. Er zal dus steeds een voorziening aanwezig moeten zijn om de spil met slijpsteen te balanceren. Bij het vervangen van een slijpschijf moet dit steeds opnieuw gebeuren.

Ondanks de overeenkomsten tussen frezen en slijpen, en tussen draaien en slijpen vertoont de constructie van slijpmachines grote verschillen met die van frees- en draaimachines. De hoge optredende krachten en de hoge nauwkeurigheidseisen bij het slijpen zijn in hoge mate bepalend voor het ontwerp van de machines. Dit betekent dat bij slijpmachines nog meer nadruk ligt op stijfheid en vormstabiliteit. Een 'opeenstapeling' van drie sleden, zoals bij draai- en freesmachines, is ongeschikt voor slijpmachines (zie ook paragraaf 13.1).

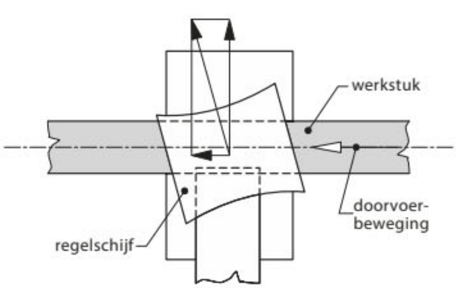
Het vlakslijpen met een cilindrische schijf kan plaatsvinden op een **horizontale slijpmachine** (zie figuur 5.96a), en het vlakslijpen met een komsteen op een **verticale slijpmachine** (zie figuur 5.96b). De pendant van de draaimachine is de **rondslijpmachine** (zie figuur 5.97). De slijpschijf en zijn aandrijving vervullen de rol van de draaibeitel. De aandrijfkop en de losse kop vervullen de rol van de vaste en de losse kop van de draaimachine. Het verschil is dat bij de slijpmachine het werkstuk de voedingsbewegingen uitvoert en het gereedschap de hoofdbeweging.

Geheel afwijkend is de **centerloze slijpmachine**. Het product ligt hierbij los op een in hoogte verstelbare liniaal (zie figuur 5.98). Door de stand van het bovenvlak van de liniaal, is de normaalkracht tussen werkstuk en **regelschijf** groter dan die tussen werkstuk en slijpschijf. Hierdoor is ook de wrijvingskracht die de regelschijf uitoefent groter dan de wrijvingskracht die de slijpschijf uitoefent. De regelschijf bepaalt daarom de omtreksnelheid van het werkstuk. Bij **insteekslijpen** beweegt de regelschijf naar het werkstuk toe tot de gewenste diameter is bereikt. Door de regelschijf schuin te stellen krijgt het werkstuk een doorvoerbeweging in langsrichting. Dit heet **doorvoerslijpen** (zie figuur 5.99). Deze bewerking wordt toegepast bij lange tot zeer lange producten, maar ook voor het achter elkaar doorvoeren van korte, in massa vervaardigde producten, zoals de buitenringen van kogellagers.

Ten slotte noemen we de **gereedschapsslijpmachines**. Dit zijn slijpmachines die speciaal voor het slijpen van gereedschappen met een complexe vorm zijn ontworpen, zoals frezen en spiraalboren.



Figuur 5.98 Principe van centerloos insteekslijpen



Figuur 5.99 Centerloos doorvoerslijpen

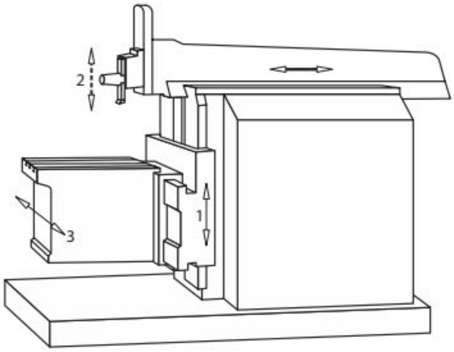
Ook slijpmachines, en in het bijzonder gereedschapsslijpmachines, zijn meestal voorzien van numerieke besturing.

5.11 Bewerkingen met een rechtlijnige hoofdbeweging

Bij de bewerkingen met een rechtlijnige hoofdbeweging onderscheiden we bewerkingen met één snijkant, **schaven** en **steken**, en die met meer snijkanten, zagen en trekfrezen. Het gereedschap maakt hierbij de hoofdbeweging, alleen bij het schaven met de sledeschaafmachine is dat niet het geval. De technologie wijkt niet wezenlijk af van de processen die we al hebben behandeld. We bespreken daarom alleen de opzet van de belangrijkste machines. Zagen behandelen we in hoofdstuk 7.

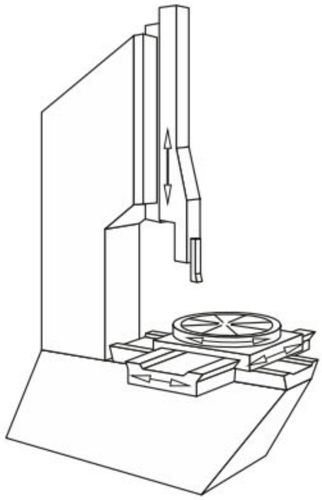
5.11.1 Schaven en steken

Bij schaven en steken maakt de beitel of het werkstuk een rechtlijnige, intermitterende beweging. De meest gangbare machine is de **sterke-armschaafmachine** (zie figuur 5.100). De grove verticale verstelling voor de aanpassing aan de hoogte van het werkstuk vindt plaats door de onderslede (1) eenmalig in te stellen. Met de beitelslede (2) kan men de snedediepte en de eindmaat van het product nauwkeurig instellen. Na elke slag van de beitel maakt de bovenslede (3) een horizontale voedingsbeweging.



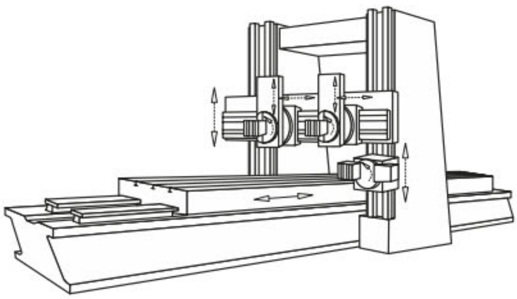
Figuur 5.100 Sterke-armschaafmachine

De **steekmachine** (zie figuur 5.101) is een variant op de sterke-armschaafmachine. Deze dient speciaal voor het steken van sleuven in al aanwezige gaten, bijvoorbeeld een spiesleuf.



Figuur 5.101 Steekmachine

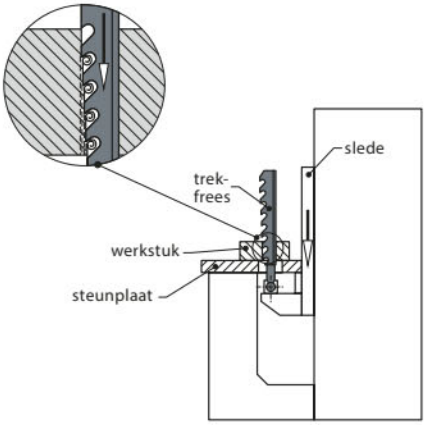
Bij de **sledeschaafmachine** maakt het werkstuk de hoofdbeweging, de beitel maakt de instel- en voedingsbewegingen (zie figuur 5.102). Schaven is een weinig efficiënt proces door het steeds weer vertragen en versnellen van grote massa's en door de loze teruggaande slag. Het verliest steeds daardoor meer terrein aan het frezen. Grote sledeschaafmachines worden zelfs wel omgebouwd tot freesmachines.



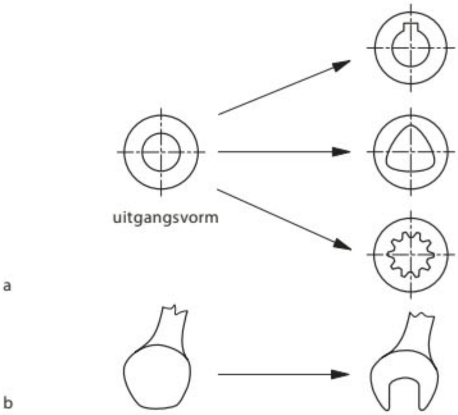
Figuur 5.102 Sledeschaafmachine

5.11.2 Trekfrezen

Bij **trekfrezen** of **brootsen** wordt al het materiaal in één beweging van het werkstuk verwijderd. De **trekfrees** of **broots** heeft een groot aantal tanden, die achter elkaar zijn gepositioneerd en steeds iets verder uitsteken (zie figuur 5.103). Elke tand snijdt dus een laagje materiaal weg, zoals dit ook bij schaven of steken zou gebeuren. De trekkop van de brootsmachine grijpt het onderste deel van de broots en trekt hem door de boring in het werkstuk. Aan het einde van de slag is de bewerking gereed.



Figuur 5.103 Trekfrezen

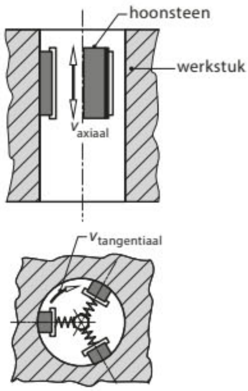


Figuur 5.104 Producten bewerkt met trekfrezen; inwendig (a) en uitwendig (b)

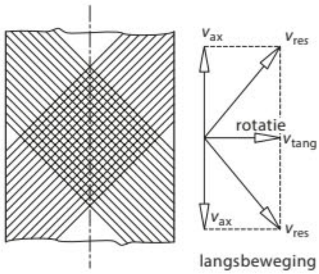
Een broots is een kostbaar, productgebonden gereedschap. Het proces leent zich dus vooral voor betrekkelijk grote productaantallen. Er worden bijvoorbeeld glijspieconstructies ('*splines*') mee gemaakt, die voorkomen in aandrijfassen van auto's. In figuur 5.104 zie je nog een aantal productvoorbeelden, zowel van inwendig als van uitwendig brootsen.

5.12 Nabewerkingen

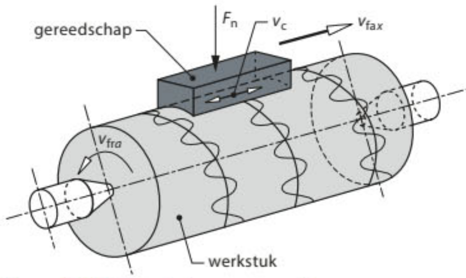
In deze paragraaf behandelen we enkele bewerkingen die uitsluitend of voornamelijk als doel hebben de oppervlaktekwaliteit van een al nauwkeurig bewerkt vlak te verbeteren. Het betreft **honen** (nabewerken van boringen), **superfijnen** (nabewerken



Figuur 5.105 Hoongereedschap



Figuur 5.106 Slijpgroeven bij honen



Figuur 5.107 Het principe van superfijnen

van uitwendige cilindrische vlakken) en **leppen**. De toegepaste technologie is die van het slijpen, maar dan met zeer fijne korrels.

Honen

Het hoongereedschap bestaat uit een houder waaraan een aantal **hoonstenen** verend is bevestigd (zie figuur 5.105). Door het gereedschap op een bepaalde diameter af te stellen, raken de stenen de gatwand met de gewenste druk. De houder maakt een roterende hoofdbeweging en tegelijkertijd een heen en

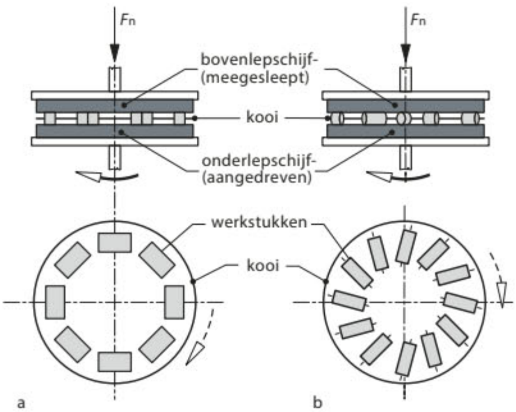
weer gaande voedingsbeweging in axiale richting. De snelheden van hoofd- en voedingsbeweging zijn ongeveer gelijk. Daardoor ontstaat er een kruiselings patroon van slijpgroeven (zie figuur 5.106). Honen wordt bijvoorbeeld toegepast om cilinderwanden van verbrandingsmotoren te voorzien van 'micro-oliereservoirs' ter vermindering van de wrijving door smering.

Superfijnen

Voor superfijnen (zie figuur 5.107) moet de vorm van de slijpsteen zijn aangepast aan de diameter van het cilindervlak. Het slijpblokje voert een heen en weer gaande hoofdbeweging uit, evenwijdig aan de hartlijn van de cilinder (v_c). De slag bedraagt enkele mm en de frequentie van de hoofdbeweging bedraagt 15-50 Hz. Naast de rotatie van het werkstuk (v_{fra}) is ook een axiale voedingsbeweging nodig (v_{fax}). Deze voedingsbeweging kan zowel door het werkstuk als door het slijpblokje worden uitgevoerd.

Leppen

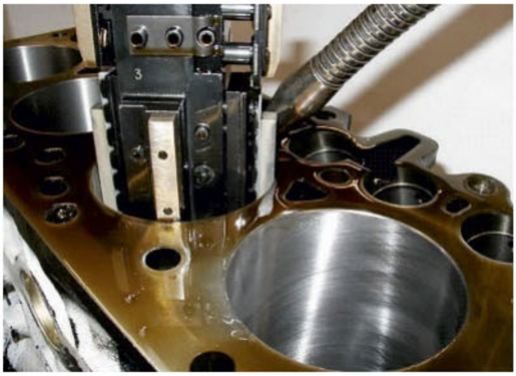
Bij leppen is het slijpmiddel gemengd met een vloeistof of pasta. Het is dus niet gebonden, zoals bij een slijpschijf. De werkstukken kunnen vlak of cilindrisch zijn en worden tussen twee gietijzeren roterende **lepschijven** geplaatst. De bewegingen van de werkstukken worden beheerst door deze in een **kooi** te plaatsen. Dit voorkomt ook dat de producten elkaar raken (zie figuur 5.108). De bewerkingsgroeven lopen in willekeurige richtingen en zijn met het blote oog vaak niet waar te nemen.



Figuur 5.108 Het leppen van vlakke (a) en cilindrische (b) werkstukken

Bij leppen is, naast de oppervlaktekwaliteit, ook vormnauwkeurigheid een belangrijke doelstelling. Men zorgt er met behulp van leppen bijvoorbeeld voor dat conische afdichtvlakken van de kleppen van zuigermotoren op elkaar passen. Van alle gangbare bewerkingsmethoden levert leppen de hoogste oppervlaktekwaliteit.

In de figuren 5.109, 5.110 en 5.111 zie je voorbeelden van honen, superfijnen en leppen.



Figuur 5.109 Honen van cilinders in motoronderdelen (Turner Engineering, UK)



Figuur 5.110 Superfijnen (Huabo)



Figuur 5.111 Leppen (Shutterstock/wideweb)

5.13 Snijvloeistoffen

We zeiden het al eerder: de energie die bij verspanende bewerkingen wordt verbruikt, wordt geheel in warmte omgezet. De warmte ontstaat door wrijving, deels in de schuifzone in het werkstukmateriaal, en deels op het contactvlak tussen het werkstuk en gereedschap. **Snijvloeistoffen** worden gebruikt om de optredende temperaturen te verlagen door:
- het verminderen van de wrijvingskrachten door middel van smeren;
- het afvoeren van de warmte door middel van koelen.

Koelen en smeren verlengen de standtijd van het gereedschap en hebben een gunstige uitwerking op de nauwkeurigheid en de oppervlaktekwaliteit van het werkstuk.
Daarnaast is een krachtige stroom snijvloeistof vaak onmisbaar bij het afvoeren van de spanen. Door de vloeistofstroom wordt bovendien het gehele systeem (machine, gereedschap en werkstuk) zo goed mogelijk op een constante temperatuur gehouden. Hierdoor blijven thermische vervormingen beperkt.

Bij bewerkingen met lage snelheden, zoals draadtappen, ligt de nadruk op het smeren. De keuze valt dan op een **minerale olie** of **plantaardige olie**. Bij hoge snelheden zijn de koelende functie en de spaanafvoer het belangrijkste. Hiervoor zijn waterige **emulsies** (melkwit) en waterige oplossingen (transparant) het meest geschikt.

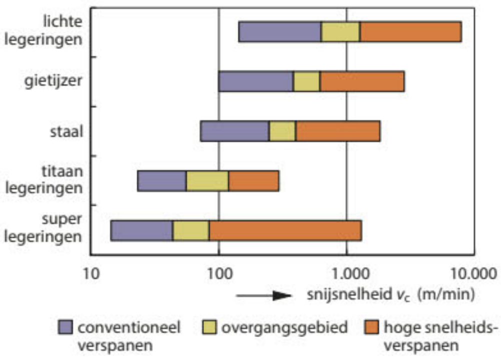
Het gebruik van snijvloeistoffen gaat gepaard met een groot aantal problemen. Producten en machines kunnen worden aangetast, het bedienend personeel kan last krijgen van huidirritatie, en er kan sprake zijn van stankoverlast door de ontwikkeling van bacteriënkolonies. Voor de bestrijding van deze problemen worden speciale componenten toegevoegd. Het milieuvriendelijk afvoeren, of nog liever hergebruiken van snijvloeistoffen levert extra problemen op. En dan zijn er nog de aanschafkosten van de snijvloeistoffen en de hoge kosten van het afvoeren als chemisch afval. Dit alles zorgt ervoor dat de gebruikskosten van snijvloeistoffen in sommige gevallen hoger zijn dan die van de snijgereedschappen en kunnen oplopen tot meer dan 10% van de totale bewerkingskosten. Het is daarom zinvol te streven naar het terugdringen of van het gebruik van snijvloeistoffen. Ze geheel vermijden zou nog beter zijn.

Minimaalsmering betekent het toevoeren van een bijzondere snijvloeistof met een hoge smerende en/of koelende werking in de vorm van een fijne nevel in nauwkeurig bepaalde, zeer kleine hoeveelheden (10-30 ml/uur). Het is dan wel nodig de vloeistofstraal precies op de juiste plaats te richten. Hiermee blijft vooral de smerende werking van de vloeistof behouden. Van koelen en afvoeren van de spanen is echter nauwelijks sprake. Voor dit laatste moeten dan dus andere oplossingen gezocht worden.
Nieuwe ontwikkelingen van gereedschapmaterialen (zie ook paragraaf 5.4), maken het mogelijk in steeds meer gevallen geheel af te zien van het gebruik van snijvloeistoffen. Dit staat bekend als **droogverspanen**. Het nadeel van een hogere temperatuur van de snijkant wordt voor een belangrijk deel gecompenseerd door minder temperatuurschommelingen. Dit is het geval bij een onderbroken snede, zoals bij frezen. De standtijd van het gereedschap is zonder koeling soms zelfs hoger dan met koeling. Ook hier kan de spaanafvoer echter problemen opleveren.

5.14 Hogesnelheidsverspanen

Bij **hogesnelheidsverspanen** worden hogere snijsnelheden toegepast dan bij conventioneel verspanen (zie figuur 5.112). Denk daarbij aan een verhoging van de snijsnelheden met factoren van 5-20. Voor het frezen van staal gelden waarden van 360 m/min, voor aluminium 1800 m/min en hoger.

Bij hoge snijsnelheden verloopt het spaanvormingsproces nagenoeg adiabatisch, dat wil zeggen dat alle warmte wordt omgezet in een temperatuurstijging



Figuur 5.112 Snijsnelheidsgebieden van conventioneel en hogesnelheidsverspanen voor verschillende werkstukmaterialen

van het spaanmateriaal. De warmte ontstaat door de intense vervorming van het werkstukmateriaal in de afschuifzone en door wrijving van de spaan over het spaanvlak. De temperatuur kan echter niet hoger worden dan de verwekingstemperatuur van het werkstukmateriaal, aangezien voor verdere toename veel extra warmte nodig is. Bij toename van de snijsnelheid treedt deze verweking het eerst op bij de contactzone van de spaan op het spaanvlak. Om afschuiving in het verweekte materiaal mogelijk te maken, is een veel lagere spanning nodig dan bij afschuiving in het harde materiaal bij een lagere temperatuur. Dit leidt tot een verandering van het spanningsevenwicht in de spaanvormingszone, waardoor onder meer de afschuifhoek ϕ (zie figuur 5.2) groter wordt en dus de grootte van het afschuifvlak kleiner wordt. De verkleining van de wrijvingskracht op het spaanvlak en de verkleining van de schuifkracht in het schuifvlak veroorzaken gezamenlijk een vermindering van de snijkracht. Bovendien worden bij hogesnelheidsverspanen over het algemeen veel kleinere snededoorsneden gebruikt. Door beide effecten zijn de optredende snijkrachten bij hogesnelheidsverspanen veel lager dan bij het gebruik van conventionele snijsnelheden. De afnamesnelheden zijn meestal vergelijkbaar of zelfs lager dan bij conventioneel verspanen, doordat het product $Q = A \times v_c$ niet toeneemt. Om de afnamesnelheid significant te verhogen, zijn hoge aandrijfvermogens nodig. Aan het einde van de vorige eeuw kwamen daar geschikte machines voor beschikbaar.
Bij het hogesnelheidsfrezen, een bewerking met onderbroken snede, treedt nog een ander voordelig verschijnsel op. Gedurende de zeer korte contacttijd tussen de snijtanden en het werkstuk worden op het spaanvlak en het vrijloopvlak niet de temperaturen bereikt die bij een stationaire toestand met vergelijkbare omstandigheden horen. Het gereedschap slijt dan ook vaak aanmerkelijk minder dan op grond van de standtijdformule van Taylor te verwachten is.

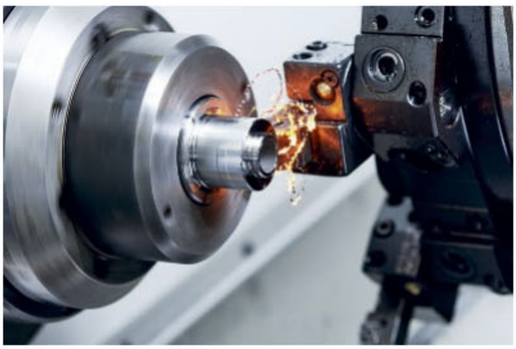
Hogesnelheidsverspanen kan bij alle gangbare verspanende bewerkingen worden toegepast. In de praktijk is de toepassing bij het frezen echter het verst gevorderd. Afhankelijk van het doel van de bewerking kan de nadruk worden gelegd op:
- het verhogen van de afnamesnelheid, waardoor tijdsbesparingen tot circa 60% bereikbaar zijn;
- het verbeteren van de oppervlaktekwaliteit en de nauwkeurigheid, waardoor het mogelijk is dure nabewerkingen zoals slijpen, polijsten en vonkverspanen te beperken, of zelfs te vervangen;
- het verlagen van de optredende snijkrachten, waardoor het mogelijk is zeer dunwandige producten te maken.

Hogesnelheidsverspanen stelt zeer hoge eisen aan de machines, vooral op het gebied van de stijfheid, het vermogen en de toerentallen van de aandrijving (500 omw/s en meer). Hetzelfde geldt voor de verwerkingssnelheid van de besturing en de bevestiging van de gereedschappen in de spil. Ook voor frezen en beitels gelden bijzondere eisen.

Tegenwoordig streeft men ernaar de totale verblijfstijd van een werkstuk op de bewerkingsmachines te verkorten. De term **high performance cutting** (HPC) wordt niet alleen voor het verkorten van de verspaningstijd gebruikt, maar ook voor het verkorten van de neventijden, zoals de wisseltijd voor werkstukken en gereedschappen, en de tijd voor inspectie en reiniging.

5.15 Hardverspanen van metallische materialen

De ontwikkeling van nieuwe machines (vooral voor hogesnelheidsverspanen) en gereedschappen (met slijtvaste deklagen) heeft het mogelijk gemaakt harde staalsoorten (met hardheden groter dan 60Rc) te bewerken. Door het toepassen van sterke gereedschappen met negatieve spaanhoek kunnen deze harde materialen toch plastisch vervormd worden, waardoor spaanvorming mogelijk is. De hoge treksterkte van het materiaal maakt kleine spaandoorsnedes (bijvoorbeeld door instelling van kleine insteekdiepte) noodzakelijk.



Figuur 5.113 Harddraaien (Shutterstock/Dmitry Kalinovsky)

Op die manier kunnen bijvoorbeeld complex gevormde matrijsonderdelen via hardfrezen nabewerkt worden, of assen via harddraaien. Vroeger diende dit via zinkvonken (zie hoofdstuk 6) of slijpen te gebeuren (zie figuur 5.113). Deze laatste technieken verdienen echter nog steeds de voorkeur. Ze zijn bovendien noodzakelijk indien hoge toleranties en nauwkeurigheden vereist zijn.

5.16 Het verspanen van niet-metalen

5.16.1 Inleiding

In het voorafgaande deel van dit hoofdstuk hebben we voornamelijk aandacht besteed aan het verspanen van metalen. Hieraan wordt in de literatuur ook verreweg de meeste aandacht gegeven. Dat is echter niet terecht. In bepaalde takken van de industriële productie worden namelijk ook veel niet-metalen verspaand. Het gaat hierbij om zeer verschillende materiaalsoorten met zeer uiteenlopende eigenschappen. Het verspanen van deze materialen kan onderling dan ook sterk van karakter verschillen. In deze paragraaf zullen we het verspanen van de belangrijkste materiaalgroepen kort behandelen. In specialistische literatuur en in leveranciersdocumentatie vind je meer specifieke informatie over de toe te passen machines en gereedschappen, en richtlijnen voor het verspanen van elk van de volgende materiaalgroepen:
- thermoplasten;
- thermoharders;
- vezelversterkte kunststoffen;
- hout en houtachtige materialen;
- glas;
- keramiek;
- steen.

Hierbij valt op dat materialen uit de vier eerstgenoemde materiaalgroepen zachter zijn dan de meeste metalen. Materialen uit de laatste drie materiaalgroepen zijn in de regel harder.
Dat betekent dat voor de eerste vier materiaalgroepen bewerkingen met een gedefinieerde snijkant in aanmerking komen, zoals draaien, boren en frezen. In het algemeen kunnen hierbij snijmaterialen met een gemiddelde hardheid worden toegepast, zoals snelstaal.
Voor het verspanen van materialen uit de laatste drie groepen past men vooral bewerkingen met ongedefinieerde snijkanten toe, zoals slijpen, honen en leppen. Hierbij wordt gebruikgemaakt van zeer harde slijpkorrels. Er komen steeds meer draai-, boor- en freesgereedschappen met zeer harde snijkanten van diamant en PCBN beschikbaar. Dit levert nieuwe mogelijkheden op voor het economisch verantwoord en zeer nauwkeurig bewerken van zeer harde materialen.

5.16.2 Verspanen van zachte materialen

Thermoplasten

Door hun hoge taaiheid en geringe warmtegeleidingsvermogen lenen de meeste thermoplasten zich niet goed voor verspanende bewerkingen. Er zijn een paar uitzonderingen: het zagen van staf, buis en plaatmateriaal, het frezen van hoogwaardige producten, zoals nylon tandwielen, en het boren en tappen van bevestigingsgaten in kleine productieseries of in enkelstuk. Dit kan echter alleen met zeer scherpe snijgereedschappen en vrij grote spaanhoeken. De toepasbare snijsnelheden zijn bovendien beperkt om het week worden van het werkstukmateriaal te vermijden.

Thermoharders

Thermoharders zijn in het algemeen brosser dan thermoplasten, maar lenen zich eveneens niet goed voor verspanende bewerkingen. Het afschuren van bramen die tijdens het persen zijn ontstaan, is wel mogelijk.

Vezelversterkte kunststoffen

Door verschillen in het basismateriaal, de soort, dikte, lengte, structuur en de hoeveelheid vezels, loopt de verspaanbaarheid van deze materialen sterk uiteen. De vezels kunnen gericht of ongericht, gelaagd of ongelaagd worden aangebracht, of in de vorm van geweven matten. Het is moeilijk gereedschappen en verspaningsmethoden te ontwikkelen die geschikt zijn voor materialen met zulke uiteenlopende eigenschappen. Vooral wanneer er sterke slijtage aan de snijkanten optreedt en er harde, taaie vezels doorgesneden moeten worden. Het verspanen van vezelversterkte kunststoffen moet dan ook zo veel mogelijk worden vermeden. Dat is echter niet altijd mogelijk. Producten uit vezelversterkte kunststoffen moeten vaak worden afgewerkt. Er ontstaan vaak rafelige randen buiten de gewenste productcontour, en die moeten worden

verwijderd. Ook moeten er vaak gaten worden aangebracht voor bevestiging of andere doeleinden. Snijgereedschappen worden gebruikt op een manier die ervoor zorgt dat de vezels worden doorgesneden in plaats van worden weggedrukt in het basismateriaal. De afzonderlijke lagen mogen niet uit elkaar worden gedrukt. Hiervoor zijn speciale verspaningsmethoden en snijgereedschappen ontwikkeld. Tijdens het frezen van de contouren van gelamineerd plaatmateriaal worden de onderscheiden lagen tegen elkaar gedrukt. Delaminatie wordt hierdoor voorkomen.

Hout en houtachtige materialen

Het verspanen van hout, spaanplaat, triplex, multiplex, MDF (*medium density fibreboard*) en gelijksoortige materialen is in de meeste gevallen niet moeilijk. De snijkrachten en de gereedschapsslijtage zijn relatief laag. Veel bewerkingen kunnen worden uitgevoerd met handgereedschappen, al dan niet aangedreven. De vezelachtige structuur veroorzaakt vaak wel problemen; gereedschappen moeten goed scherp zijn om splintervorming te voorkomen en de snijsnelheid moet hoog genoeg zijn. Metaalbewerkingsmachines zijn in de regel minder geschikt voor houtbewerking. Schuren is een bekende techniek om de gewenste oppervlaktegesteldheid te bereiken. Tegenwoordig wordt ook in de houtbewerking veel gebruikgemaakt van numeriek bestuurde machines. Daardoor kunnen de talloze verschillende onderdelen ook in kleinere series nauwkeurig worden vervaardigd.

5.16.3 Verspanen van harde materialen

Glas

Voor het verspanen van de meeste glassoorten komen alleen abrasieve bewerkingen in aanmerking, zoals slijpen, honen en leppen. In de glasindustrie is slijpen de meest voorkomende verspanende bewerking. Indien er geen hoge eisen worden gesteld aan maat- en vormnauwkeurigheid kan in veel gevallen uit de hand worden gewerkt. Het werkstuk wordt dan met de hand langs een vaststaande slijpschijf geleid, of er wordt juist een handslijptol langs het werkstuk geleid. Als er hogere nauwkeurigheden nodig zijn, zoals bij de fabricage van brillenglazen en lenzen, gebruikt men slijpmachines met vergelijkbare constructies als in de metaalbewerking. Ook honen en leppen worden toegepast voor de vervaardiging van nauwkeurige oppervlakken.

Keramiek

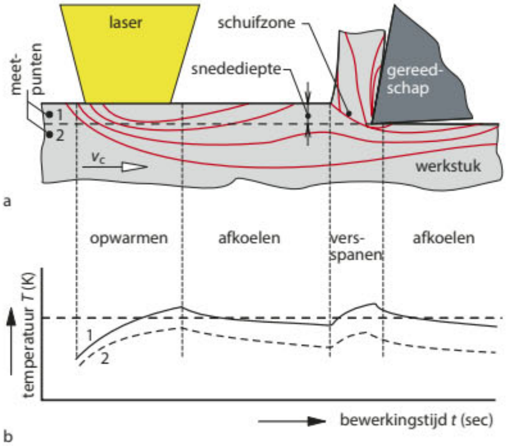
Bij het verspanen van keramiek moeten we onderscheid maken tussen de gewone keramiek en de hoogwaardige moderne technische keramiek. De gewone keramiek wordt al eeuwenlang in de bouw en in het huishouden gebruikt. Onder de hoogwaardige moderne technische keramiek vallen bijvoorbeeld de hardmetalen en de keramische snijmaterialen die we eerder in dit hoofdstuk hebben behandeld. Het verspanen van conventionele keramiek is betrekkelijk eenvoudig, zeker als er geen hoge eisen aan de nauwkeurigheid worden gesteld. Wel zorgt het werkstukmateriaal ervoor dat het gereedschap sterk slijt. Er moet dan ook hardmetalen gereedschap worden gebruikt, bijvoorbeeld de bekende steenboor.
Voor de technische keramiek komen alleen diamanten slijpkorrels in aanmerking. Vanwege de hoge slijpkrachten moet de stijfheid van de slijpmachines bijzonder hoog zijn. De hoge elasticiteitsmodulus van de keramiek veroorzaakt een hoge vormstijfheid van de werkstukken. Daarom stelt men vaak hoge eisen aan de vormnauwkeurigheid van oppervlakken die elkaar functioneel raken. Denk hierbij aan afdichtingsvlakken. De gereedschapsslijtage is hoog en als gevolg daarvan is de standtijd van de slijpgereedschappen kort. Het materiaal is bijzonder gevoelig voor het ontstaan van scheurtjes in het bewerkte oppervlak. De keuze van de juiste condities is bij slijpen, honen en leppen moeilijk.

Steen

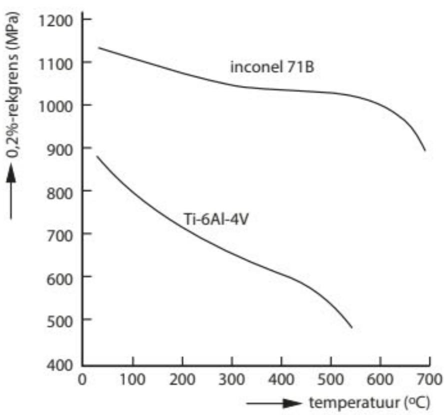
Het verspanen van natuursteen is een belangrijke industriële activiteit. In de bouw worden steeds vaker nauwkeurig bewerkte platen natuursteen gebruikt, voor vloeren, gevelbekleding en vele andere toepassingen. Deze kunnen alleen worden bewerkt door verspanen met een gereedschap dat is voorzien van gedefinieerde snijkanten bezet met diamantkorrels (bijvoorbeeld boorgereedschap en zaaggereedschap). De omzet van diamanten gereedschappen is hier verreweg het grootst, aangezien het hier gaat om bewerkte oppervlakken van honderden vierkante meters. Omdat de soorten gesteenten en de gestelde eisen aan de oppervlakken enorm uiteenlopen, bestaan er veel verschillende machines, gereedschappen en slijpcondities.

5.17 Nieuwe ontwikkelingen – geassisteerde mechanische bewerkingsprocessen

Het bewerken van hooggelegeerde staalsoorten of andere legeringen (bijvoorbeeld Inconel of titaanlegeringen) met een hoge treksterkte en/of hardheid is mogelijk door tijdens het proces de bewerkbaarheid van deze materiaal te verbeteren. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren door het te bewerken materiaal lokaal op te warmen met een laser. Dit noemen we laserondersteund bewerken (zie figuur 5.114). Door het opwarmen wordt de treksterkte sterk verlaagd, waardoor ook de specifieke snijkracht daalt (zie figuur 5.115).



Figuur 5.114 Principe van het laserondersteunend draaien. Het verspaningsproces met laserondersteuning (a) en het temperatuurverloop in de tijd (b)



Figuur 5.115 Temperatuursafhankelijkheid van de 0,2%-rekgrens

Een andere nieuwe ontwikkeling is trillingsondersteund verspanen. Hierbij wordt aan het gereedschap (of aan het werkstuk) een bijkomende trilling opgelegd. Door het trillen wordt de bewerkbaarheid en/of de spaanvorming verbeterd. Trillingsondersteund verspanen wordt vooral gebruikt bij draaien en slijpen. Trillingsfrequenties variëren van enkele Hz tot 80kHz. Indien de frequentie zich bevindt in het ultrasoon gebied, spreekt men van ultrasoonondersteund draaien en/of slijpen.

Samenvatting

Afnemende (verspanende) bewerkingen zijn in principe ongewenst, maar worden noodgedwongen zeer veel toegepast. Vooral in de grootserie- en massafabricage zal men verspanende bewerkingen zo veel mogelijk vermijden.

Verspanende bewerkingen bestaan in verschillende uitvoeringsvormen (zoals draaien), gatbewerkingen (zoals boren, ruimen en tappen), frezen, slijpen en bewerkingen zoals steken en schaven. Machines worden met de hand bediend of automatisch via computer (numerieke besturing).

Bij verspanende bewerkingen zoekt men naar gereedschapsmaterialen met een hoge warmhardheid en slijtvastheid. De volgende materialen kennen deze eigenschappen in oplopende mate (maar ook oplopende kosten): ongelegeerde of gelegeerde staalsoorten, snelstaal, hardmetaal, gecoate snijmaterialen, cermets, keramische snijmaterialen, polykristalijn kubisch boriumnitride en diamant. Het werkstukmateriaal en de bewerkingsomstandigheden zijn bepalend voor de keuze van het snijmateriaal. Economische factoren spelen een grote rol bij de keuze van de instelgrootheden.

De gevraagde vorm, nauwkeurigheid en oppervlaktekwaliteit bepalen de verspaningsmethode. Kennis van processen, machines en gereedschappen is onmisbaar bij het ontwerpen van verspanend bewerkte producten.

Er vinden nog voortdurend nieuwe ontwikkelingen plaats op het gebied van verspaningsmethoden, -gereedschappen en -machines. Hierdoor kunnen producten van hogere kwaliteit worden vervaardigd, in kortere tijd en tegen lagere kosten.

Het verspanen van niet-metalen is een omvangrijk terrein met zeer uiteenlopende problemen. Hoewel de economische belangen groot zijn, is over dit gebied veel minder bekend.

Literatuur

5.1 Kalpakjian S., Schmid S.R., *Manufacturing Engineering and Technology*, 7th edition, Pearson, 2014, ISBN 978-0133128741. Hoofdstuk 21 'Fundamentals of machining; hoofdstuk 22 'Cutting tool materials and cutting fluids'; hoofdstuk 23 'Machining processes: turning and hole making'; hoofdstuk24 'Machining processes: milling, broaching, sawing, filing and gear manufacturing'; hoofdstuk 26 'Abrasive machining and finishing operations'.

5.2 Groover M.P., *Principles of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems*, 5th edition, John Wiley & Sons Inc., 2013, ISBN: 978-1-118-47140-1. Hoofdstuk 19 'Theory of metal machining'; hoofdstuk 20 'Machining operations and machining tools'; hoofdstuk 21 'Cutting-tool technology'; hoofdstuk 22 'Economic and product design considerations in machining'; hoofdstuk 23 'Grinding and other abrasive processes'.

5.3 *Modern Metal Cutting, A Practical Handbook*, Sandvik Coromant 1994, ISBN 91-972299-0-3.

5.4 Deckers, J.W. en Schellekens, R., *Verspaningstechnologie*, Noordhoff Uitgevers BV, 4e druk, 2001, ISBN 978-90-01-24311-1.

Symbolenlijst

Symbool		Omschrijving	Eenheid
a	=	Snedediepte	[mm]
A	=	Snededoorsnede	[mm²]
b	=	Snedebreedte, actieve breedte slijpschijf of frees	[mm]
C	=	Constante in formule van Taylor	[-]
C^*	=	Constante in formule maximale voeding (boren)	[-/omw]
C_b	=	Constante in formule breukmoment (boren)	[N]
C_f	=	Constante in formule voedingskracht (boren)	[-]
C_M	=	Constante in formule aandrijfmoment (boren)	[-]
d	=	Diameter (respectievelijk draai-, boor-, freesdiameter)	[mm]
d_{max}	=	Grootste draaidiameter	[mm]
d_r	=	Plaatselijke diameter (boren)	[mm]
d_z	=	Diameter ziel van spiraalboor	[mm]
f	=	Voeding	[mm/omw]
f_{max}	=	Maximale voeding (boren)	[mm/omw]
f_z	=	Voeding per tand (frezen)	[mm]
F	=	Snijkracht	[N]
F_c	=	Hoofdsnijkracht	[N]
F_{ch}	=	Snijkracht op hoofdsnijkant spiraalboor	[N]
F_{cz}	=	Snijkracht op dwarssnijkant spiraalboor	[N]
F_f	=	Voedingskracht	[N]
F_h	=	Horizontale snijkracht	[N]
F_n	=	Normaalkracht	[N]
F_p	=	Terugdrukkracht	[N]
F_t	=	Tangentiële snijkracht	[N]
F_v	=	Verticale snijkracht	[N]
G	=	Slijpverhouding	[-]
h	=	Snededikte	[mm]
h_{gem}	=	Gemiddelde snededikte (frezen)	[mm]
h_{max}	=	Grootste snededikte (frezen)	[mm]
k_c	=	Specifieke snijkracht	[MPa]
$k_{c1.1}$	=	Specifieke snijkracht bij snededoorsnede 1×1 mm²	[MPa]
KT	=	Kolkdiepte	[mm]
l_c	=	Contactlengte (slijpen)	[mm]
l_g	=	Gatdiepte	[mm]
L	=	Standlengte (boren)	[mm]
M_b	=	Breukmoment (boren)	[Nm]
M_c	=	Aandrijfmoment	[Nm]
n	=	Exponent in formule van Taylor	[-]
		Toerental	[omw/s]
N	=	Neusslijtage	[mm]
		Standtal	[-]
p_c	=	Specifieke energie (slijpen)	[J/mm³]
P_c	=	Snijvermogen	[W]
P_f	=	Voedingsvermogen	[W]
P_m	=	Benodigd aandrijfvermogen	[W]
P_{max}	=	Beschikbaar motorvermogen	[W]
Q	=	Afnamesnelheid	[mm³/s]
Q'	=	Afnamesnelheid per mm actieve schijfbreedte	[mm³/s/mm]
Q_m	=	Afnamesnelheid beperkt door aandrijfvermogen	[mm³/s]
r_s	=	Radius slijpschijf	[mm]
r_ε	=	Neusradius	[mm]
$R_{a(k)}$	=	Kinematische waarde van de ruwheid R_a	[mm]
$R_{t(k)}$	=	Kinematische waarde van de ruwheid R_t	[mm]
T	=	Standtijd	[min]
u	=	Exponent in formule voor optimale snijsnelheid	[-]
v_c	=	Snijsnelheid	[m/s]
$v_{c1.1}$	=	Optimale snijsnelheid bij snededoorsnede 1×1 mm²	[m/s]
$v_{c\text{-}max}$	=	Snijsnelheid, beperkt door aandrijfvermogen	[m/s]
$v_{c\text{-}opt}$	=	Optimale snijsnelheid bij minimale kosten	[m/s]
v_f	=	Voedingssnelheid	[m/s]
v_{nn}	=	Snijsnelheid waarbij de standtijd nn minuten bedraagt	[m/min]
v_w	=	Voedingssnelheid werkstuk (slijpen)	[m/s]
VB	=	Breedte vrijloopvlakslijtage	[mm]
x_f	=	Exponent in formule voedingskracht (boren)	[-]
x_M	=	Exponent in formule aandrijfmoment (boren)	[-]
x_ω	=	Exponent in formule breukmoment (boren)	[-]
y_f	=	Exponent in formule voedingskracht (boren)	[-]
y_M	=	Exponent in formule aandrijfmoment (boren)	[-]
z	=	Aantal tanden van een frees	[-]
z_i	=	Aantal tanden dat tegelijkertijd snijdt (frezen)	[-]
α	=	Vrijloophoek	[°]
		Veiligheidscoëfficiënt (boren)	[-]
β	=	Wighoek	[°]
γ	=	Spaanhoek	[°]
ε	=	Exponent in snijkrachtformule	[-]
		Punthoek (beitel, boor)	[°]
χ	=	Instelhoek (draaien)	[°]

λ	=	Hellingshoek (draaien)	[°]
σ	=	Spoedhoek (boren)	[°]
ϕ	=	Afschuifhoek	[°]
		Ingrijphoek (frezen)	[°]
ω	=	Hoeksnelheid	[rad/s]

Oefenvragen

5.1 Welke variabelen bepalen de snijkracht? Geef ook aan in welke zin de variabelen de snijkracht beïnvloeden.

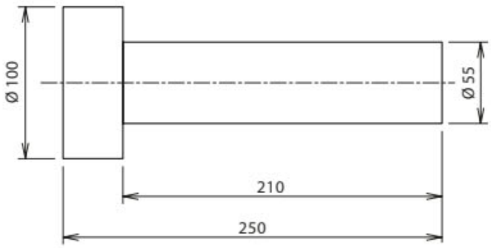
5.2 Kies aan de hand van figuur 5.18 het juiste snijmateriaal voor het voorfrezen van een stalen product, waarbij een onderbroken snede optreedt. Vermeld hiervan de ISO-aanduiding.

5.3 Je beschikt over een werkstukmateriaal en een snelstalen gereedschap met een Taylor-exponent $n = 0{,}125$. Bij een verhoging van de snijsnelheid met 50% wordt de standtijd gereduceerd met een factor K.
Bereken de waarde van K.

5.4 Er worden twee draaiproeven uitgevoerd met een as van ∅80 mm. In het eerste geval met een snedediepte van 2 mm en een voeding van 0,2 mm/omw. In het tweede geval met een snedediepte van 6 mm en een voeding van 0,6 mm/omw.
Verder beschik je over de volgende gegevens:
de specifieke snijkracht:
$k_{c1.1} = 1600$ MPa,
de waarde van de exponenten:
$\varepsilon = 0{,}25$
$u = 0{,}35$
en de snijsnelheid:
$v_{c1.1} = 1{,}5$ m/s.

Bereken de hoofdsnijkracht F_c, de snijsnelheid v_c, het benodigde snijvermogen P_c, het aandrijfmoment M_c, het toerental van de spil n en de afnamesnelheid Q voor beide combinaties.

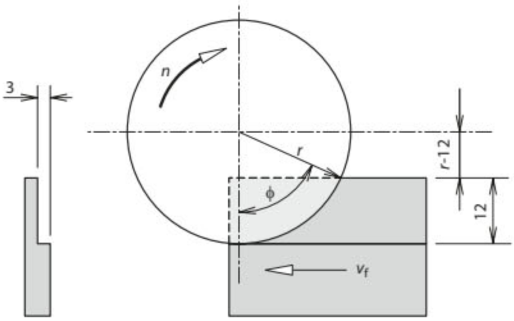
5.5 Een as van ∅100 mm en 250 mm lang wordt over een lengte van 210 mm voorgedraaid tot een diameter van ∅55 mm (zie bijgaande figuur) met een constante snijsnelheid van 2 m/s en een voeding van 0,5 mm/omw. De snedediepte bedraagt maximaal 5 mm. Bereken de zuivere verspaningstijd t_c.



Figuur bij oefenvraag 5.5

5.6 Uit een blok uitgangsmateriaal wordt een rechthoekig vormelement ('stapje' 3×12mm) gefreesd (zie bijgaande figuur). De totale diepte van 3 mm wordt in één stap bewerkt. De bewerking wordt uitgevoerd met een kopfrees (diameter ∅ 40 mm, met 5 tanden). Het toerental van de frees is 13 omw/s. De voedingssnelheid is $v_f = 0{,}01$ m/s. De gemiddelde snijkracht van één snijkant is $F_{c1} = 2750$ N.

a Hoeveel tanden snijden tegelijk (z_i)?
b Hoe groot is het voor het verspanen benodigde vermogen (P_c)?
c Bepaal de afnamesnelheid (Q).
d Schets in een grafiek het verloop van de snijkracht (F_c) als functie van de tijd.



Figuur bij oefenvraag 5.6

5.7 Wat wordt bedoeld met de hardheid van een slijpsteen en wat wordt bedoeld met de structuur van een slijpsteen? Wanneer zal men kiezen voor een slijpsteen met een lage hardheid? Wanneer voor een slijpsteen met een dichte structuur? Licht de aard van de structuur toe met een schets.

5.8 a Bij het draaien van relatief slanke werkstukken kan het werkstuk worden weggedrukt. Dit komt vooral door de terugdrukkracht.
De opspanning van de beitel en de lagering van de centers waartussen het werkstuk is gepositioneerd, worden als oneindig stijf beschouwd.
Schets deze situatie en laat in je schets duidelijk zien:
- de situatie tijdens het draaien;
- de baan van het gereedschap ten opzichte van de verbindingslijn tussen de centers;
- het resultaat van de bewerking.

b Beantwoord vraag a, maar nu voor een stijf werkstuk met een stijve opspanning van het gereedschap en elastische lagering van de centers.
c Beantwoord vraag a, maar nu voor een stijf werkstuk met een elastische opspanning van het gereedschap en stijve lagering van de centers.

5.9 Bij gelaste constructies ziet men soms dat de onderdelen eerst verspanend bewerkt worden en vervolgens aan elkaar worden gelast. Het komt echter ook andersom voor: dat de onderdelen eerst aan elkaar gelast worden en vervolgens nog verspanend worden bewerkt.
Waarom komen beide gevallen voor?

inclusief website!

Op www.industrieleproductie.nl vind je de antwoorden op deze vragen, maar ook extra studie- en oefenmateriaal, zoals video's en meer opgaven.

6 Fysische en chemische afnemende bewerkingen

In dit hoofdstuk behandelen we een aantal bewerkingstechnieken die bekendstaan als niet-conventionele bewerkingen. De diversiteit van deze technieken is groot en ze kunnen niet zonder meer worden ingedeeld onder de methoden die we hiervoor reeds hebben behandeld (oervormen, omvormen, verspanen). Ze bieden ook andere toepassingsmogelijkheden dan we in de voorafgaande hoofdstukken hebben beschreven. Aan de orde komen de grondslagen, de varianten en de toepassingsgebieden. Een bijzondere groep technieken wordt gevormd door de materiaalaangroeitechnieken. Deze behandelen we in een apart hoofdstuk (hoofdstuk 8).

6.1 Indeling fysische en chemische afnemende bewerkingen

Er bestaan nog veel meer bewerkingstechnieken dan de technieken die we in de voorgaande hoofdstukken hebben behandeld. Veel daarvan berusten op andere principes dan de zuivere mechanische interactie tussen gereedschap en werkstuk. Men duidt ze wel aan als fysische en chemische bewerkingen. Een belangrijke groep zijn de thermische, chemische en elektrochemische bewerkingen (zie paragraaf 6.2). Materiaalafname wordt bij deze bewerkingen gekenmerkt door fysische of chemische principes, dus niet door mechanische spanningen in het werkstuk. Daardoor ontbreken bewerkingskrachten. Wel is er vaak een medium dat enige kracht op het werkstuk uitoefent. In de meeste gevallen wordt het afgenomen materiaal zeer fijn verdeeld. De bewerkbaarheid van het werkstukmateriaal hangt niet af van de mechanische eigenschappen, bijvoorbeeld de hardheid bij het verspanen of de rekgrens bij het omvormen, maar van een combinatie van chemische en fysische eigenschappen. Deze combinatie is per bewerking verschillend.
Bij **thermische bewerkingen** wordt het te bewerken materiaal zeer lokaal verhit, soms tot boven de smelt- of verdampingstemperatuur (zie paragraaf 6.2.1).

Tot deze groep behoren:
- vonkverspanen (vonkerosie, zie paragraaf 6.2.2);
- brandsnijden (zie paragraaf 7.3.1);
- sommige bewerkingen met stralen met hoge vermogensdichtheid (zie paragraaf 6.4).

Bij **elektrochemische bewerkingen** wordt materiaal afgenomen door elektrolyse (zie paragraaf 6.2.3). Bij chemische bewerkingen wordt het te verwijderen materiaal afgenomen door een chemische reactie (zie paragraaf 6.2.4).

Andere technieken zijn het ultrasoon bewerken (zie paragraaf 6.3) en een groep bewerkingen door middel van stralen met hoge energiedichtheid, die berusten op verschillende principes. Deze laatste bewerkingen behandelen we in paragraaf 6.4.

De meeste bewerkingen die we in dit hoofdstuk behandelen, dienen voor scheiden (zie hoofdstuk 7) of afnemen. Daarnaast komen ook enkele technieken voor het verbinden, omvormen en het veranderen van materiaaleigenschappen aan de orde.

6.2 Thermische, elektrochemische en chemische afnemende bewerkingen

6.2.1 Thermische bewerkingen in het algemeen

Het medium

Bij de thermische bewerkingen bereikt men het gewenste effect – meestal dus een vormverandering van het werkstuk – door zeer lokale verhitting van het werkstuk. Het bekendst zijn de toepassingen bij scheidende en afnemende bewerkingen. Door lokale verhitting smelt of verdampt het materiaal plaatselijk. Door te voorkomen dat dit materiaal weer op dezelfde plaats neerslaat of stolt, wordt het van het werkstuk verwijderd. Een vloeistof of gas zorgt voor het materiaaltransport. Bij de hoge temperatuur oxideren de meeste materialen snel. De vloeistof of het gas dient dan ook als bescherming tegen oxidatie. Sommige materialen verbranden al beneden de smelttemperatuur. Daarbij komt veel warmte vrij. Die warmte kan bijdragen aan het verhitten van het materiaal, zodat de externe energiebron minder energie hoeft te leveren. Om dit effect te versterken wordt zuurstof toegevoerd, dat dient voor verbranding. In dit laatste geval dient de externe warmtebron vooral om de bewerking goed te kunnen beheersen. Dit wordt toegepast bij brandsnijden. Bij het conventionele brandsnijden is de externe warmtebron een gasvlam, bij het laserbrandsnijden een laser (zie paragraaf 6.4.5).

Temperatuureffecten en veranderingen in de oppervlaktelaag

Bij thermische bewerkingen ontstaat altijd een zone in het werkstukmateriaal waarin door de temperatuurverhoging veranderingen hebben plaatsgevonden. Dit is een **warmtebeïnvloede zone**.
Er zijn in principe twee situaties:

- Soms zijn die lokale materiaalveranderingen een doel op zich. Men spreekt dan van **thermische oppervlaktebehandelingen** (zie ook hoofdstuk 10). De keuze van de verhittingsmethode en de condities moeten zorgvuldig worden afgestemd op de te bereiken temperatuur op het werkstukoppervlak, de indringdiepte en de duur van de temperatuurverhoging. Dit is noodzakelijk om het gewenste effect (bijvoorbeeld harding over een bepaalde diepte) te verkrijgen.
- Meestal is de aanwezigheid van een door warmte beïnvloede zone ongewenst, omdat deze bepaalde nadelige gevolgen heeft. Bij de keuze van de bewerkingsmethode en bij de uitvoering ervan dient men daar goed rekening mee te houden. In de meeste gevallen blijkt dat bij een hoge energiedichtheid (een hoge concentratie van energie op een klein oppervlak) de omvang van de warmtebeïnvloede zone relatief klein is. Bij veel moderne bewerkingstechnieken streeft men dan ook naar een hoge energiedichtheid.

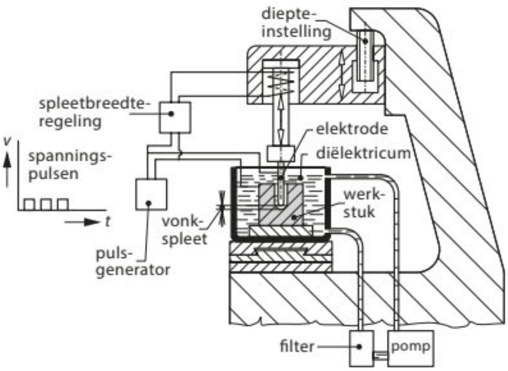
Door lokale temperatuurverhogingen vervormen werkstukken elastisch en soms zelfs plastisch. Deze temperatuurverhogingen worden veroorzaakt door bewerkingsprocessen in de dunne oppervlaktelaag of elders, vaak over een groter gebied verspreid. Na afkoelen kunnen er blijvende vormveranderingen, restspanningen en zelfs scheuren overblijven. Dit is in de regel ongewenst.

Bij weer andere bewerkingen kan aan het werkstukoppervlak een dunne laag ontstaan, waarin (meestal ongewenste) veranderingen in het werkstukmateriaal optreden. Deze veranderingen worden veroorzaakt door chemische reacties of door mechanische effecten. Voorbeelden hiervan zijn versteviging en (micro)scheuren of oxidatie. Men duidt een dergelijke randzone wel aan met **chemisch beïnvloede zone** of **mechanisch beïnvloede zone**.

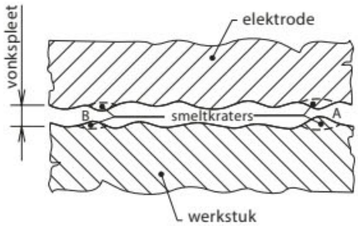
6.2.2 Vonkerosie

Principe van vonkerosie

Vonkerosie, ook **vonkverspanen** of **EDM** (**electrical discharge machining**) genoemd, is een bewerkingsmethode die berust op de erosieve werking van de elektrische vonk. Het principe van de bewerking is als volgt (zie figuur 6.1). Een **elektrode** is het gereedschap. Deze elektrode bevindt zich op geringe afstand (5-100 μm) van het te bewerken materiaal, dat elektrisch geleidend moet zijn. Het geheel is gedompeld in een isolerende vloeistof, het **diëlektricum**. Een **pulsgenerator** legt een pulserende spanning aan tussen de elektrode en het werkstuk. Indien de aangelegde spanning groter is dan de doorslagspanning van de dunne laag diëlektricum, vindt een elektrische ontlading (vonk) plaats, waardoor het materiaal plaatselijk smelt en zelfs gedeeltelijk verdampt. Deze cyclus wordt zeer snel achter elkaar herhaald. Een pomp zorgt



Figuur 6.1 Schematisch overzicht van een zinkvonkmachine



Figuur 6.2 Zelfregelende spleetbreedte bij het vonkverspanen

voor een geregelde doorspoeling van de vonkspleet met vloeistof. Het geërodeerde materiaal wordt als gestolde bolletjes met een zeer kleine diameter teruggevonden in het filter. Dit filter is geplaatst in het vloeistofcircuit.

De ontlading vindt plaats waar de veldsterkte het grootst is, dat wil zeggen daar waar de afstand tussen elektrode en werkstuk het kleinst is (zie figuur 6.2). Ter plaatse ontstaat een smeltkratertje. De dampdruk in het kokende gesmolten materiaal blaast de krater gedeeltelijk leeg. Vervolgens zal er weer een ander punt zijn waar de doorslagspanning tussen werkstuk en elektrode het laagst is. Dit proces herhaalt zich na iedere ontlading. Het is dus nodig dat iedere ontlading na korte tijd (in de orde van microseconden) eindigt. Dit is essentieel bij vonkerosie. Bij een continue ontlading zou er namelijk op één plaats een diepe krater ontstaan die zich onbeheerst uitbreidt. Het proces tast als het ware het werkstuk af. Na een zeker aantal ontladingen is het hele te bewerken oppervlak 'aan de beurt' geweest. De **spleetbreedteregeling** zorgt ervoor dat de juiste afstand tussen elektrode en werkstuk gehandhaafd blijft.

Het bewerkte oppervlak ziet eruit als een kraterlandschap. Een lage energie per ontlading heeft een kleine kraterinhoud tot gevolg. Dit gaat samen met een oppervlak met weinig thermische beschadiging en een lage ruwheid, maar ook met een lage bewerkingssnelheid.

De benodigde spanning voor doorslag is ongeveer 100-300 V. De pulsgenerator zorgt ervoor dat alle ontladingen dezelfde ontladingstijd (1-200 μs) en stroomsterkte (5-200 A) hebben. De ontladingsfrequentie kan tussen 50 kHz en 1 MHz bedragen. De energie per puls kan nogal variëren:

- minder dan 0,1 mJ voor fijne nabewerkingen, resulterend in ruwheden $R_a < 0{,}5$ μm en afnamesnelheden $Q_w < 0{,}001$ mm³/s. De bereikbare nauwkeurigheid komt overeen met tolerantieklasse IT 6 (zie hoofdstuk 12);
- maximaal circa 1 J voor zeer grove voorbewerkingen, resulterend in ruwheden rond $R_a = 10$ μm en afnamesnelheden Q_w tot circa 2,5 mm³/s.

Het proces verloopt goed als men de goede waarden kiest. Men kan kiezen voor een hoge bewerkingssnelheid of voor een goede oppervlaktekwaliteit. De elektrodeslijtage is bij de oppervlaktekwaliteit wel een beperkende factor. Deze hangt mede af van het elektrodemateriaal. Veelgebruikte elektrodematerialen zijn koper, vanwege de goede warmtegeleiding, en grafiet, vanwege de goede warmtebestendigheid. De keuze van het elektrodemateriaal wordt in belangrijke mate bepaald door de prijs, de kosten voor het vervaardigen van de elektrode en het werkstukmateriaal. Veelvoorkomende combinaties hebben we weergegeven in figuur 6.3.

Toepassingen van vonkerosie

Vergelijk de waarden voor de afnamesnelheid die we hebben vermeld bij de energie per puls met de waarden die we hebben berekend in de paragrafen 5.7.1 en 5.10.1. Daaraan zie je dat vonkerosie een tijdrovend en dus kostbaar proces is.

Redenen om vonkerosie toe te passen kunnen zijn:

- een grote hardheid van het werkstukmateriaal (zoals we al schreven is de hardheid geen belemmering voor de bewerkbaarheid);
- een complexe vorm van het werkstuk;
- de zeer lage bewerkingskrachten (dit is bijvoorbeeld van belang bij dunwandige werkstukken of slanke gereedschappen).

Elektrodemateriaal	Werkstukmateriaal				
	staal	hardmetaal	aluminium	messing	grafiet
elektrolytisch koper	++	+	++	++	+
grafiet (voorbewerking)	+	-	+	+	-
grafiet (nabewerking)	++	+	++	++	-
wolframkoper	++	++	++	++	+

++ zeer geschikt, + geschikt, – ongeschikt

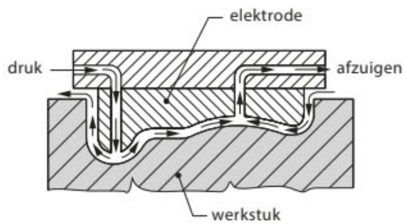
Figuur 6.3 Keuze van het elektrodemateriaal voor vonkverspanen bij een gegeven werkstukmateriaal

Hoofdgroepen van vonkbewerkingen

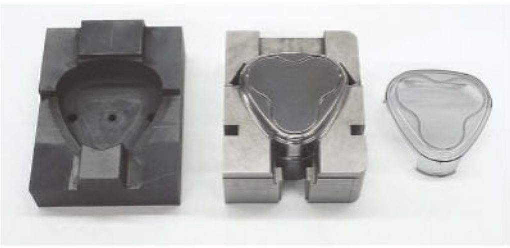
We bespreken hier zinkvonken, planetair vonken, contourvonken, vonkfrezen en draadvonken.

Zinkvonken is het vervaardigen van blinde of doorlopende gaten door een elektrode geleidelijk dieper in het werkstuk te laten zakken (zinken, zie figuur 6.1). De spleetbreedteregeling zorgt ervoor dat de afstand tussen de elektrode en het werkstuk op overslagafstand wordt gehandhaafd.
Er treedt vormomkering op: in het werkstuk ontstaat een gat dat het negatief is van de vorm van de elektrode. De afvoer van het afgenomen materiaal vindt plaats door drukspoeling of afzuiging via een boring in de elektrode (zie figuur 6.4).

Zinkvonken wordt vooral toegepast wanneer het vervaardigen van een uitwendige vorm veel gemakkelijker is dan het vervaardigen van een inwendige vorm, en bij de bewerking van zeer harde materialen. De belangrijkste toepassingen vind je daarom bij gereedschapsmakerijen voor het vervaardigen van matrijzen, (zie figuur 6.5). De bereikbare maatnauwkeurigheid ligt rond 0,01 mm; de R_a-waarde rond 0,5 µm.



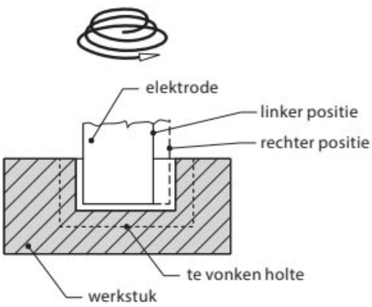
Figuur 6.4 Drukspoelen en afzuigen bij het zinkvonken



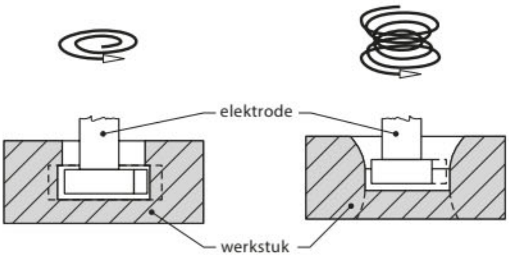
Figuur 6.5 Grafietelektrode (a) voor het zinkvonken van de RVS-spuitgietmatrijs (b) van de polycarbonaat stofkap (c) voor het Philips-scheerapparaat

Door de elektrode langs een baan in het horizontale vlak te sturen terwijl de hoogte constant blijft, ontstaat in het werkstuk een gat met een doorsnede die groter is dan die van de elektrode. Men noemt dit **planetair vonken**. Daarmee kan men drie effecten bereiken:
- compensatie van de elektrodeslijtage (zie figuur 6.6);
- vergroting van de vormgevingsmogelijkheden van één elektrode (zie figuur 6.7);
- verbetering van de spoeling, omdat de plaats waar de materiaalafname plaatsvindt steeds wijzigt, waardoor een hogere afnamesnelheid mogelijk is.

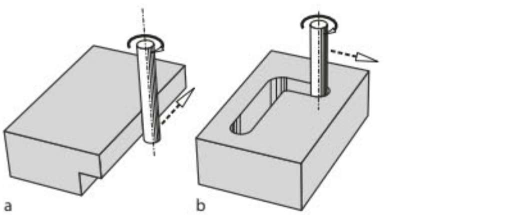
De vormgevingsmogelijkheden van zinkvonken worden nog groter door de toepassing van numerieke besturing (zie ook hoofdstuk 13). Een eenvoudig gevormde massieve elektrode van eenvoudige vorm wordt hierbij langs een geprogrammeerde baan gestuurd en genereert daardoor de gewenste werkstukvorm. Men noemt dat **contourvonken** (zie figuur 6.8). Door de elektrode te roteren terwijl er tegelijkertijd een verticale voedingsbeweging plaatsvindt, is het mogelijk gaten met een spiraalvorm te vonken. Door de elektrode een geprogrammeerde horizontale baan te laten doorlopen, terwijl deze geleidelijk in het werkstuk zakt, kunnen complexe gatvormen worden vervaardigd. Door de verticale beweging van de elektrode te stoppen en vervolgens alleen een horizontale voedingsbeweging te geven, is het mogelijk gaten te vervaardigen met een zijaanzicht in de vorm van de letters L of (omgekeerde) T.



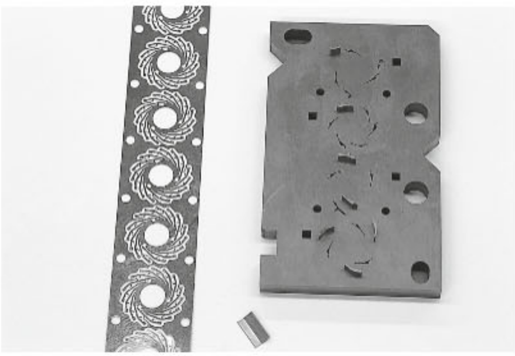
Figuur 6.6 Compensatie van de elektrodeslijtage bij het zinkvonken door planetair vonken



Figuur 6.7 De vervaardiging van gaten met veranderlijke doorsnede door planetair vonken



Figuur 6.8 Voorbeelden van contourvonken (a) en vonkfrezen (b)



Figuur 6.9 Snijplaat met snijders, vervaardigd van hardmetaal door draadvonken, voor het uitsnijden van de 'spin' (links) voor het Philips-scheerapparaat

Een variant van het contourvonken is **vonkfrezen** (zie figuur 6.8). Vonkfrezen wordt vooral voor microbewerkingen toegepast. Hierbij worden kleine ronddraaiende elektroden gebruikt. De bewerkingsmogelijkheden zijn vergelijkbaar met die van numeriek bestuurd frezen (zie hoofdstuk 13). Door de rotatie van de elektrode wordt de elektrodeslijtage gelijkmatig over de omtrek verdeeld. Door de betere spoeling van de vonkspleet is het mogelijk om bij gelijkblijvende werkstukruwheid en slijtagesnelheid van de elektrode de afnamesnelheid van het werkstukmateriaal aanzienlijk op te voeren.

Draadvonken is een scheidende bewerking (zie ook hoofdstuk 7). Hierbij wordt een draad tussen nauwkeurig bestuurbare geleidingen gespannen. Deze draad dient als elektrode, en hiermee wordt door vonkerosie een fijne snede gemaakt (zie figuur 7.27). Het proces doet denken aan figuurzagen. De breedte van de snijspleet is de draaddiameter (0,05-0,5 mm) vermeerderd met tweemaal de vonkspleetbreedte (0,01-0,2 mm). De draad raakt het werkstuk niet. De draad wordt langzaam in axiale richting doorgevoerd, zodat steeds 'verse' draad als elektrode fungeert. De besturing beweegt het werkstuk in X- en Y-richting. Door het sturen van de geleidingen kan de draad schuin gesteld worden onder een vaste of veranderlijke hoek. De baan wordt uitgedrukt in X- en Y-coördinaten. De hoek wordt eveneens uitgedrukt in twee coördinaten bijvoorbeeld α en β of in de voortlooprichting en loodrecht daarop (er zijn ook andere mogelijkheden). Deze coördinaten worden vastgelegd in het werkstukprogramma, net als de vonkcondities in de vorm van generatorinstellingen. Op deze wijze kunnen schuine en conische vlakken gemaakt worden. De materiaaldikte kan meer dan 250 mm bedragen. De draad kan onder een hoek tot maximaal 45° ten opzichte van de normaal op de werkstuktafel staan. Door deze bewegingsmogelijkheden kunnen alle productvormen waarvan de vlakken zijn opgebouwd uit rechte beschrijvende lijnen (regeloppervlakken) met grote nauwkeurigheid worden vervaardigd.

Een belangrijke toepassing van het draadvonken is het maken van snijplaten voor ponsgereedschap (zie figuur 6.9). Voor draadvonken hoeven geen dure productgebonden elektroden gemaakt te worden, zoals voor zinkvonken. Er hoeft veel minder materiaal te worden verwijderd.

Bij draadvonken drukt men de afnamesnelheid meestal uit in mm^2/s (materiaaldikte × voedingssnelheid). Momenteel ligt de grens bij circa 2,5 mm^2/s. Omdat er maar weinig materiaal wordt verwijderd, gaat draadvonken toch redelijk snel. Bovendien werkt een eenmaal ingestelde machine geheel zonder menselijk ingrijpen. Moderne draadvonkmachines zijn uitgerust met een aantal voorzieningen waardoor de machine een heel weekeinde autonoom kan werken.

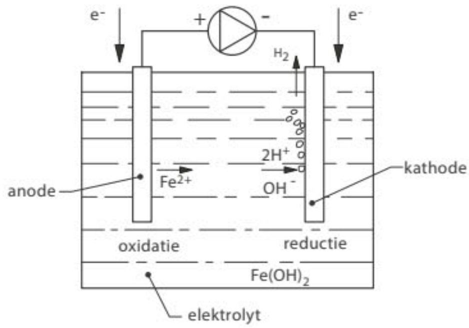
Vonkerosie is onmisbaar in gereedschapsmakerijen en fijnmechanische werkplaatsen. Ook daarbuiten neemt het aantal toepassingen toe. In de eerste plaats voor het maken van werkstukken in moeilijk verspaanbare materialen, maar ook indien een hoge nauwkeurigheid of zeer lage bewerkingskrachten vereist zijn.
De laatste jaren is het vonkverspanen van matrijsholtes gedeeltelijk vervangen door het hogesnelheidsfrezen van gehard staal (zie paragraaf 5.14).

6.2.3 Elektrochemische bewerkingen

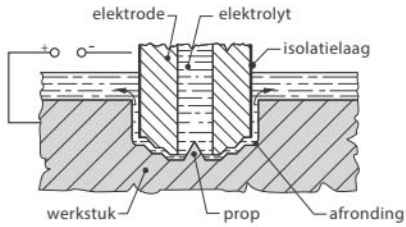
Elektrochemisch bewerken berust op elektrolyse, waarbij anodemateriaal elektrochemisch wordt opgelost bij stroomdoorvoer (zie figuur 6.10). Wanneer bijvoorbeeld staal wordt bewerkt, vinden de volgende reacties plaats:

Aan de anode:	$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$
In de vloeistof:	$H_2O \rightarrow OH^- + H^+$
Aan de kathode:	$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$
Neerslag van ijzerhydroxide:	$Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 \downarrow$

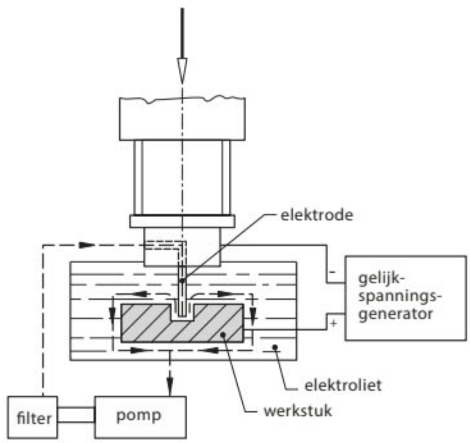
Om het geleidingsvermogen van de **elektrolyt** te vergroten wordt een zout toegevoegd. De reacties worden daardoor iets ingewikkelder dan we hiervoor hebben aangegeven, maar het resultaat is hetzelfde. Het zout wordt niet verbruikt.



Figuur 6.10 Het anodisch oplossen van metaal



Figuur 6.11 Elektrochemisch frezen



Figuur 6.12 Machine voor elektrochemisch frezen

Er bestaan verschillende bewerkingsmethoden waarbij gebruik wordt gemaakt van elektrolyse, zoals elektrochemisch frezen en ontbramen en elektrolytisch slijpen en polijsten. **Elektrochemisch frezen** (**ECM**, **electrochemical milling**) is hiervan de belangrijkste. Net als bij zinkvonken is bij ECM het gereedschap een elektrode waarvan de vorm het negatief is van het werkstuk (zie figuur 6.11). Deze elektrode (kathode) is doorboord met kanalen, waardoor de elektrolytische vloeistof wordt gepompt. Tussen elektrode en werkstuk (anode) wordt een spleet in stand gehouden. Als gevolg van de stroomdoorgang lost het werkstukmateriaal op en wordt vormomkering bewerkstelligd. Het is nodig de vloeistof met hoge snelheid door de spleet te pompen om de afvalproducten (H_2 en metaalhydroxide) te verwijderen. Wegens de nauwe spleet is daarvoor een hoge druk nodig. Het vloeistofsysteem is dan ook een belangrijk onderdeel van de machine voor elektrochemisch frezen (zie figuur 6.12).
De geometrie van ECM vertoont dus overeenkomsten met die van zinkvonken. Het fysische principe

is echter geheel anders. Materiaalafname bij EDM is gebaseerd op een elektrothermisch principe en er wordt gewerkt met een isolerende vloeistof, terwijl ECM gebaseerd is op een elektrochemisch principe, waar gewerkt wordt met een geleidende vloeistof. De afnamesnelheid kan in het laatste geval veel groter zijn. De toelaatbare stroomdichtheid van 1,5-8 A/mm^2 vormt een beperking. De stroomsterkte kan meer dan 10.000 A bedragen, bij een spanning van 5 tot 20 V. De stroomdichtheid (en dus ook de stroomsterkte) wordt begrensd door een aantal factoren. De toelaatbare temperatuur is vaak het belangrijkst. De elektrolyt mag niet gaan koken, dus de vloeistofstroom moet groot genoeg zijn.

De afnamesnelheid is hoog. Hierdoor is serieproductie veelal tegen redelijke kosten mogelijk. In principe is de afnamesnelheid evenredig met de stroomsterkte, bijvoorbeeld 300 mm^3/s bij 10.000 A. Deze waarde hangt samen met de atoommassa en de valentie van de elementen in het werkstukmateriaal. De specifieke afnamesnelheid ligt voor de meeste metaallegeringen tussen 0,01 en 0,05 mm^3/A.s. Er is geen sprake van elektrodeslijtage. De haalbare nauwkeurigheid is beperkt: meestal niet beter dan IT-klasse 9. De elektrode moet zo zijn gevormd dat de juiste werkvorm wordt verkregen ondanks de verschillen in spleetbreedte die bij het proces optreden.

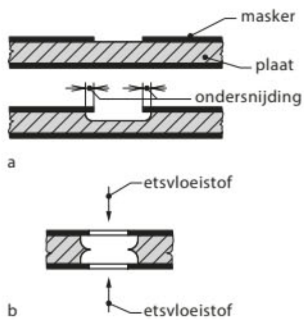
ECM wordt toegepast in de gereedschapsmakerij (bijvoorbeeld bij het nabewerken van de vormholte van smeedmatrijzen), maar meer nog bij producten met complexe vormen en producten die worden vervaardigd uit moeilijk te bewerken materialen, zoals Ni-legeringen. Voorbeelden van dit soort producten zijn kooien van rollagers en turbineschoepen.

Elektrochemisch frezen kan milieuverontreiniging veroorzaken, dus men moet kostbare maatregelen nemen om dit te voorkomen. Ook de corrosieproblemen in de wijde omgeving van een ECM-machine vormen een nadeel van dit proces.

6.2.4 Chemische bewerkingen

Bij de chemische bewerkingen wordt materiaal afgenomen door chemische aantasting zonder stroomdoorgang. In tegenstelling tot bij ECM is er geen elektrode en geen vormomkering. De delen van het werkstuk waarvan geen materiaal hoeft te worden verwijderd, worden afgedekt met een chemisch bestendig **masker**. Vervolgens wordt het werkstuk in een bad met een chemisch agressieve vloeistof gedompeld. Het niet-afgedekte oppervlak lost overal met gelijke indringsnelheid op. Veel verschillende materialen kunnen op deze manier worden bewerkt. De hardheid speelt geen rol. Het ontbreken van bewerkingskrachten op het werkstuk is vaak een belangrijke reden om voor dit proces te kiezen. Er treden geen ongewenste vervormingen bij op, tenzij er inwendige spanningen aanwezig zijn in het materiaal. Het is daarom mogelijk zeer dunne delen te vervaardigen. De afmetingen van de werkstukken kunnen zeer groot zijn en worden alleen beperkt door de grootte van het etsbad. Er ontstaan geen scherpe overgangen en geen bramen. Een belangrijke toepassing is chemisch frezen. Een variant hierop is foto-etsen.

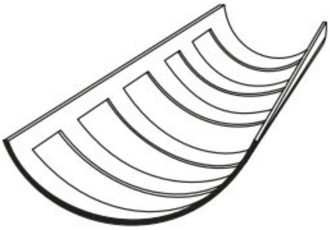
Bij **chemisch frezen** gaat het om betrekkelijk grote producten en het verwijderen van materiaal over grote oppervlakken. Het masker wordt aangebracht door spuiten. Daarna snijdt men dit weg op de plaatsen waar geëtst moet worden. Door het materiaal lokaal en slechts gedurende een bepaalde tijd aan het etsmiddel bloot te stellen, kan men plaatselijk een verdunning aanbrengen (zie figuur 6.13a). Het plaatmateriaal kan ook over de volle dikte weggeëtst worden (zie figuur 6.13b). Door producten geleidelijk uit het bad te hijsen, is het mogelijk een verlopende dikte te realiseren (zie figuur 6.14). De plaatdikte kan zo worden aangepast aan de plaatselijk optredende belasting. Chemisch frezen wordt bijvoorbeeld toegepast bij de vervaardiging van huidpanelen in de vliegtuigbouw. Daarbij zijn belangrijke gewichtsbesparingen mogelijk (zie de figuren 6.14 en 6.15).



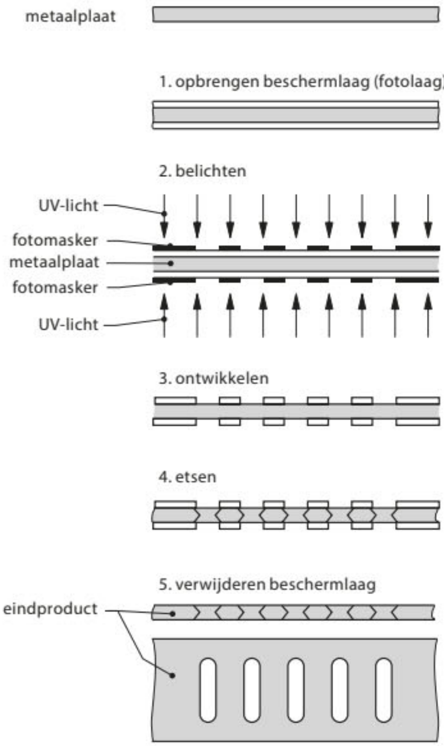
Figuur 6.13 Principe van eenzijdig (a) en tweezijdig (b) chemisch frezen



Figuur 6.14 Plaatselijke verdunningen en verlopende dikte, vervaardigd met chemisch frezen



Figuur 6.15 Huidpaneel van een vliegtuig, vervaardigd met chemisch frezen



Figuur 6.16 De procesgang van het foto-etsen

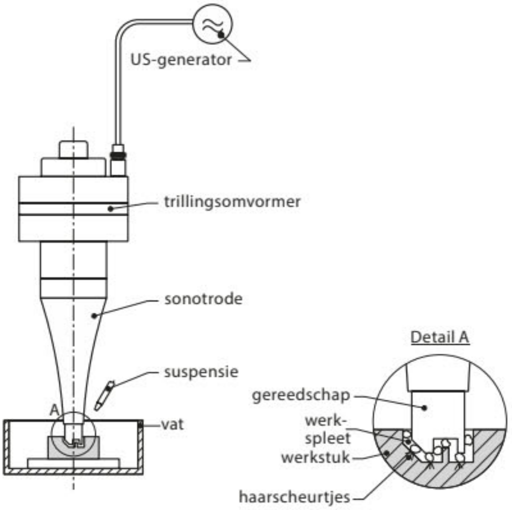
Een grove structuur van het werkstukmateriaal heeft een ongunstige invloed op de ruwheid na de bewerking. Ook kan de oppervlaktekwaliteit van het geëtste oppervlak slechter worden door verontreinigingen en oppervlaktefouten op het uitgangsoppervlak. Deze plaatselijke materiaalafwijkingen zorgen voor ongelijke etssnelheden. Hierdoor zijn fouten na de bewerking versterkt terug te vinden. De indringsnelheid is niet hoog: maximaal 2 µm/s, meestal veel lager. De snelheid hangt af van de samenstelling van het werkstukmateriaal, de samenstelling en concentratie van het etsmiddel en de temperatuur. Door de concentratie of de temperatuur te veranderen kan men de etstijd en de nauwkeurigheid van het product beïnvloeden. Bij grote oppervlakken kan het volume verwijderd materiaal per tijdseenheid groter zijn dan bij mechanische verspanende bewerkingen, zeker als de toelaatbare verspaningskracht een beperking is. De nauwkeurigheid in diepterichting kan groot zijn. Een bron van onnauwkeurigheid in de richting evenwijdig aan het plaatoppervlak is het optreden van ondersnijding. Hiervan is de grootte niet nauwkeurig te voorspellen (zie figuur 6.13).

Terwijl het bij chemisch frezen meestal om grote werkstukken gaat, gaat het bij **foto-etsen** overwegend om kleine werkstukken, waarbij slechts weinig materiaal wordt afgenomen. Foto-etsen wordt toegepast bij (zeer) dunne plaat, vooral indien een hoge nauwkeurigheid wordt vereist. Het masker bestaat hierbij uit een chemisch bestendige, lichtgevoelige laag. Voorafgaand aan het etsen wordt deze laag plaatselijk belicht en daarna ontwikkeld en gefixeerd (zie figuur 6.16). Het productgebonden gereedschap is een film die dient voor het belichten van de maskering. Deze film kan de afbeelding van een groot aantal producten bevatten.

Foto-etsen wordt in het bijzonder toegepast bij de vervaardiging van elektronische en fijnmechanische componenten, meestal in kleine series. Een voorbeeld van een in massa gefabriceerd product is het scheerblad van scheerapparaten met een heen en weer gaande beweging (onder andere van Braun). Het is hierbij van groot belang dat er geen braamvorming optreedt, net als bij elektrochemisch bewerken. Varianten van foto-etsen worden veel gebruikt in de halfgeleiderindustrie (chips).

6.3 Ultrasoon bewerken

Figuur 6.17 toont het principe van **ultrasoon bewerken**. Hierbij wordt een gereedschap gebruikt waarvan de geometrie bepalend is voor de vorm van het te maken product. Dat lijkt dus op de elektrode bij vonkverspanen of elektrochemisch bewerken. Tussen het gereedschap en het werkstuk bevindt zich een spleet die gevuld is met een substantie waarin



Figuur 6.17 Het principe van ultrasoon bewerken

abrasieve korrels van zeer gelijkmatige grootte zijn opgenomen. Door een trilkop wordt een ultrasone trilling (bijvoorbeeld 25 kHz) opgewekt. Deze trilling wordt door de typische vorm van de **sonotrode** versterkt overgebracht op het gereedschap. Het gereedschap hamert op de korrels en die hameren weer op het werkstuk. Als het werkstukmateriaal hard genoeg is, ontstaan daarin lokaal scheurtjes en breken er stukjes uit. Op die manier wordt geleidelijk het werkstukmateriaal afgenomen en wordt de vorm van het gereedschap afgebeeld in het werkstuk. Het gereedschap is van zacht staal. In de praktijk is enige gereedschapsslijtage (vergelijkbaar met elektrodeslijtage bij het vonkverspanen) niet te vermijden.

Bij de beschreven vorm van ultrasoon bewerken scilleert de sonotrode dus loodrecht op het werkstukoppervlak. Het afnamemechanisme is gebaseerd op bros gedrag van het werkstukmateriaal. Soms wordt er gewerkt met de zijkant van de sonotrode. Het actieve vlak van de sonotrode beweegt dan evenwijdig met het werkstukoppervlak. Er vindt een relatieve beweging van de korrels langs het werkstukoppervlak plaats. Bij zachtere materialen leidt dit tot spaanvorming zoals bij leppen. Deze bewerking wordt daarom ook aangeduid met **ultrasoon leppen**.

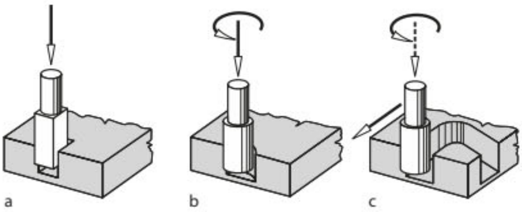
Ultrasoon bewerken is dus geschikt voor het bewerken van brosse materialen waar nauwelijks of geen plastische vervorming mogelijk is. Er kan dus geen spaan ontstaan door het afschuifproces (zie paragraaf 5.2). Wanneer een beitel of gereedschap indrukt op een materiaal dat betrekkelijk weinig bindingssterkte tussen de korrels bevat, zoals baksteen, dan ontstaan op de korrelgrenzen gemakkelijk scheuren en is de beitel toch in staat materiaal af te nemen. Dit bros bezwijken van materiaal kost betrekkelijk weinig energie. Er treedt dan ook geen belangrijke temperatuurverhoging op. Wel moet het gereedschap hard zijn om voldoende weerstand te bieden tegen slijtage. Om indrukking van het gereedschap te voorkomen, moet de Vickershardheid van het gereedschap ten minste drie maal die van het werkstuk zijn. Als de hardheid van het werkstukmateriaal en de bindingssterkte toenemen, wordt de belasting op het gereedschap groter. Alleen slijpkorrels of diamantbeitels zijn in staat om zeer harde materialen zoals hardmetaal, glas en keramiek goed te bewerken. Het is moeilijk om het ontstaan van microscheurtjes in het werkstukoppervlak te voorkomen bij het slijpen of verspanen van deze zeer harde werkstukmaterialen.

Er zijn andere bewerkingen die berusten op hetzelfde principe als ultrasoon bewerken, zoals waterstraalbewerken, abrasief waterstraalbewerken, abrasief straalbewerken en ionenstraalbewerken. We bespreken deze bewerkingen in paragraaf 6.4.

Ultrasoon bewerken leent zich dus goed voor het bewerken van zeer harde materialen die niet elektrisch geleidend zijn. Een hoge hardheid van het werkstukmateriaal is hierbij vaak een voordeel. Dat blijkt ook uit de volgende waarden, die geldig zijn voor een machine voor ultrasoon bewerken waarvan de trilkop een vermogen heeft van 600 W. Voor staal bedraagt de afnamesnelheid Q_w 0,03 mm^3/s, voor hardmetaal 0,7 mm^3/s en voor sommige glassoorten wordt zelfs een afnamesnelheid van 25 mm^3/s bereikt.

Om voldoende hoge lokale spanningen in het werkstukoppervlak te krijgen, mogen er niet te veel korrels in de spleet tussen het gereedschap en het werkstuk aanwezig zijn. De korrels moeten daarnaast scherpe kanten hebben. Ook moet het verwijderde materiaal afgevoerd worden. De substantie in de spleet moet dan ook doorlopend ververst worden. De benodigde hoeveelheid is echter klein. De spleetwijdte tussen het werkstuk en het gereedschap is ongeveer gelijk aan de korrelgrootte.

Men kan productgebonden gereedschapsvormen gebruiken. Men kan ook gebruikmaken van eenvou-



Figuur 6.18 Ultrasoon zinken (a), ultrasoon boren met roterende sonotrode (b) en ultrasoon contourfrezen (c)

dige gereedschapsvormen en de mogelijkheden van numerieke besturing (zie hoofdstuk 13) benutten. Deze laatste manier om productvormen te genereren is vergelijkbaar met contourvonken (zie figuur 6.18).

Ultrasoon bewerken wordt gebruikt voor de vervaardiging van nauwkeurige vormen in harde materialen zoals glas en keramiek, voornamelijk voor technische toepassingen. Een voorbeeld van een product is het huis van een polshorloge, vervaardigd uit natuursteen.

6.4 Bewerken met stralen met hoge vermogensdichtheid

6.4.1 De aard van de straal

De bewerkingen die we in deze paragraaf behandelen komen tot stand door de kinetische energie van (zeer) kleine deeltjes met (zeer) hoge snelheid te concentreren, waardoor een nauwe bundel met een zeer hoge -vermogensdichtheid (W/mm^2) ontstaat. De sterk geconcentreerd toegevoerde energie krijgt zeer weinig tijd om zich door warmtegeleiding naar de omgeving te verspreiden. De processen spelen zich daarom in korte tijd en in een zeer beperkte omgeving af. Men spreekt daarom over **straalbewerkingen**, of ook wel over **puntbewerkingen**. Figuur 6.19 geeft een overzicht van de gebruikelijke energiedragers, met voorbeelden van de daarmee uitgevoerde bewerkingen.

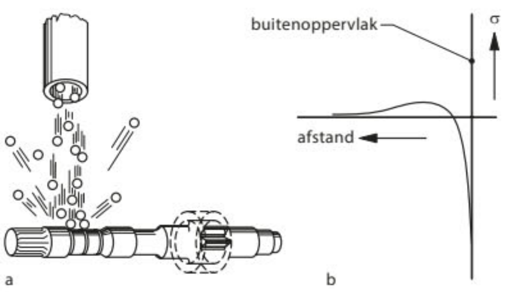
De deeltjes krijgen hun snelheid door een mechanische versneller (voor vaste stof), vloeistof- of gasdruk, een elektrisch of magnetisch veld, of een lichtbron. Afhankelijk van de vermogensdichtheid kan in het werkstuk plastische vervorming, spaanvorming, smelten of zelfs verdampen optreden.

Energiedrager	Bewerking
vaste stof:	
kogeltjes van glas of metaal	kogelstralen
korrels van metaal	staalstralen
abrasief materiaal	abrasief stralen
vloeistof (water)	waterstralen
vaste stoffen in vloeistof	abrasief waterstralen
vaste stoffen in gas	abrasief luchtstralen
ionen	ionenstralen of ionenbundel
elektronen	elektronenstralen
fotonen	laserstralen
geïoniseerde gassen	plasmastralen

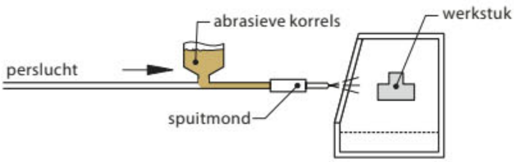
Figuur 6.19 Overzicht van bewerkingen met stralen, gebruikmakend van verschillende energiedragers

6.4.2 Stralen met vaste deeltjes

Kogelstralen (**shot-peening**) is een oppervlaktebehandeling (zie figuur 6.20). Hierbij ontstaat een plastische vervorming die het oppervlak van de buitenste laag van het werkstuk wil vergroten. De dieper gelegen lagen ondergaan geen plastische vervorming. Drukspanningen in het oppervlak en trekspanningen onder het oppervlak zorgen voor elastische vervormingen, zodanig dat de lagen weer aan elkaar passen. De resulterende spanningsverdeling hebben we afgebeeld in figuur 6.20b. De drukspanningen in het oppervlak verhogen de vermoeiingssterkte aanzienlijk. Het bereikte spanningsniveau wordt bepaald door de massa en de trefsnelheid van de kogels. Voor het stralen met lage intensiteit gebruikt men glasparels, voor het stralen met hogere intensiteit staalkorrels van verschillende afmetingen. Kogelstralen is een voorbeeld van een mechanische oppervlaktebehandelingstechniek. Deze technieken worden toegepast om de eigenschappen van de oppervlaktelaag te beïnvloeden.



Figuur 6.20 Het kogelstralen (a) en de spanningsverdeling in de oppervlaktelaag (b)



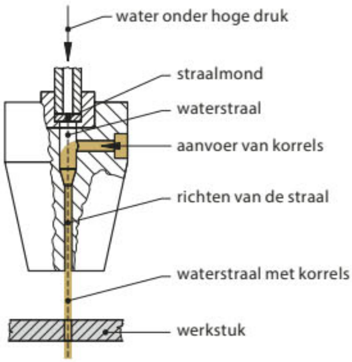
Figuur 6.21 Abrasief stralen

Bij eenzijdig bestraalde werkstukken van plaatmateriaal is de spanningsverdeling asymmetrisch. In de doorsnede is geen momentenevenwicht. De drukspanningen in het oppervlak leiden tot vervormingen die het momentenevenwicht herstellen. Door de beweging en de intensiteit van de straal volgens een programma te besturen kan men plaatdelen in de gewenste vorm brengen. Deze werkwijze, **peenforming**, wordt in de vliegtuigindustrie toegepast voor het bewerken van huidpanelen met een verspringende dikte, waardoor rolbuigen (zie paragraaf 4.5.1) niet mogelijk is. Peenforming behoort dus tot de omvormtechnieken.

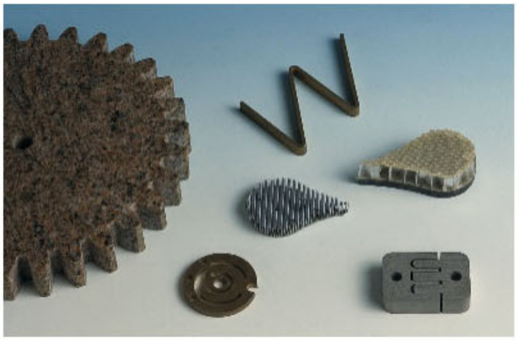
Als men willekeurig gevormde korrels met scherpe kanten toepast, ontstaan er bij het treffen van het materiaal op kleine vlakjes zulke hoge spanningen dat er materiaalafname plaatsvindt. Bij gebruik van slijpkorrels vindt spaanvorming plaats. Men spreekt dan van **abrasief stralen** (**AJM** oftewel **abrasive jet machining**, zie figuur 6.21). De korrels worden door een luchtdruk van 0,6 tot 0,8 MPa versneld. Met fijne korrels kan men delicate voorwerpen bewerken. Zand en staalgrit hebben een reinigende werking. **Staalstralen** wordt onder andere gebruikt voor het reinigen van gietstukken in de gieterij en voor het verwijderen van roest en walshuid, voordat men beschermende lagen aanbrengt. Lichtere kogels (bijvoorbeeld kersenpitten), die met betrekkelijk lage snelheid worden 'afgeschoten', worden soms gebruikt om voorwerpen te reinigen. Zand is schadelijk voor de longen en mag alleen nog worden toegepast wanneer er geen enkel alternatief beschikbaar is. Bovendien moeten er dan strenge veiligheidsvoorschriften in acht worden genomen.

6.4.3 Waterstraalbewerken

Door gedemineraliseerd water onder hoge druk (tot circa 400 MPa = 4000 bar), door een nauw mondstuk (met een diameter < 0,5 mm) te persen ontstaat een straal met hoge snelheid (> 800 m/s). De zeer hoge druk maakt het gebruik van een kostbare drukversterker noodzakelijk (zie figuur 7.28). De straal leent



Figuur 6.22 Mengkop voor abrasieve waterstraalbewerking



Figuur 6.23 Producten gesneden met hogedrukwaterstraal met abrasieftoevoeging

zich goed voor het snijden van betrekkelijk zachte materialen als papier, karton, textiel en vezelversterkte kunststoffen, en ook voor brosse materialen die betrekkelijk weinig samenhang vertonen, zoals baksteen en leisteen. Men spreekt dan van **waterstraalsnijden** (zie ook paragraaf 7.3.5).

De energiedichtheid kan sterk worden verhoogd door het toevoegen van een vaste stof met een hogere dichtheid dan water. Figuur 6.22 toont de mengkop. Voor de vaste stof kiest men korrels met scherpe kanten. Men spreekt nu van **abrasief waterstraalsnijden** (*abrasive water jet machining*, AWJM). Dit is een mechanische bewerking die overwegend niet-plastisch van aard is, net als ultrasoon bewerken. Hiermee wordt een 'gereedschap' verkregen dat een grote verscheidenheid aan materialen kan snijden, waaronder materialen die met andere mechanische of thermische processen moeilijk of niet te snijden zijn. Voorbeelden hiervan zijn glas, natuursteen, metalen, hittebestendige legeringen, metaalcomposieten en zelfs pantserplaat (zie ook figuur 6.23).

Wanneer de procesvariabelen zorgvuldig worden gekozen, kan (abrasief) waterstralen ook toegepast worden om gleuven met een bepaalde diepte, of zelfs kamers te maken. Hogedrukwaterstralen worden ook wel toegepast om goed aanhechtende lagen (bijvoorbeeld keramische deklagen voor slijtagebescherming) plaatselijk te verwijderen. Voor het reinigen van aanhechtend vuil zijn veel minder hoge drukken nodig, tot circa 150 MPa. Een kostbare drukversterker is dan niet nodig; men kan volstaan met een goedkopere hogedrukpomp.

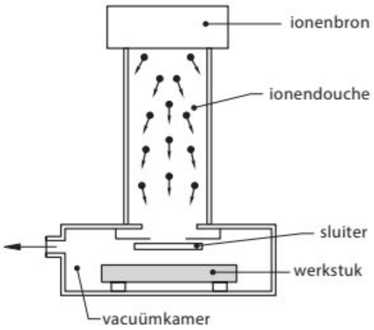
6.4.4 Bewerken met ionen

Door van atomen één of meer elektronen weg te nemen, verkrijgt men ionen. De functie van een ionenbron is het leveren van zulke ionen. De positief geladen ionen kunnen worden versneld in een elektrisch veld. Gebeurt dit over een breed oppervlak, dan spreekt men over een **ionendouche** (zie figuur 6.24). Men kan de ionen met behulp van een magnetisch of elektrostatisch veld echter ook bundelen tot een nauwe straal, een **ionenstraal** (zie figuur 6.25). Het geheel bevindt zich in een vacuümruimte. Indien de ionen een werkstukoppervlak treffen, kunnen er verschillende verschijnselen optreden. Deze zijn afhankelijk van twee groepen van factoren, op het gebied van de ionenstraal en het werkstukoppervlak.
Factoren op het gebied van de ionenstraal:
- de intensiteit;
- de soort ionen (massa en afmetingen);
- de kinetische energie;
- de trefhoek;
- de verblijftijd.

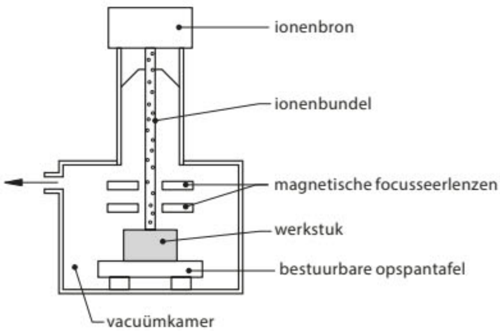
Factoren op het gebied van het werkstukoppervlak:
- het werkstukmateriaal, met name de roosterafstand van de atomen;
- de mate van verontreiniging van het oppervlak.

Mogelijkheden voor het bewerken met ionen

Bij een lage kinetische energie en bij geschikte procescondities hechten de ionen zich aan het oppervlak. Dit is de grondslag van een hele familie van **opdamptechnieken**, waarbij ionen vanuit de gasfase in een vacuümkamer in een laag met een dikte van enkele micrometers op voorwerpen neerslaan. Dit wordt toegepast voor het aanbrengen van slijtagebestendige deklagen (coatings) van keramisch materiaal op onder andere gereedschappen (zie hoofdstuk



Figuur 6.24 Principe van de ionendouchebewerking



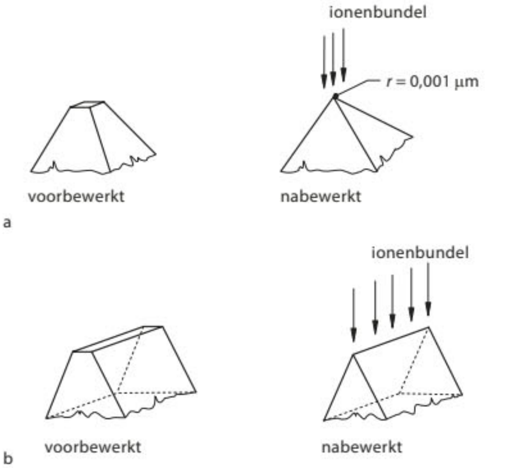
Figuur 6.25 Principe van de ionenstraalbewerking

5) en op producten als spiegels en lenzen om de optische eigenschappen te verbeteren. Men kan de gewenste eigenschappen van de deklaag bereiken door de juiste ionen te kiezen.

Bij een wat hogere kinetische energie kunnen de ionen loszittende deeltjes op het werkstukoppervlak verwijderen. Deze reinigingsmethode gaat vaak vooraf aan opdampen.

Kleine ionen, zoals waterstof of stikstof, zien bij hoge snelheid kans in de ruimten tussen de atomen van het werkstukoppervlak te dringen. Men spreekt dan van **ionenimplantatie**. De indringdiepte en concentratie van de vreemde ionen kunnen sterk verschillen. Deze vreemde ionen verstoren het atoomrooster, waardoor het materiaal harder en slijtvaster wordt. Een voordeel hiervan is dat de overgang van materiaaleigenschappen geleidelijker is dan bij opdampen. De techniek is echter moeilijker en duurder.

Grotere ionen met genoeg snelheid zien zelfs kans om de atomen van het werkstuk uit hun rooster-



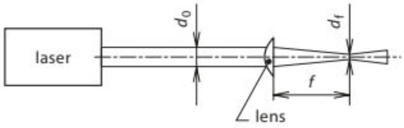
Figuur 6.26 Toepassing van materiaalafname door ionen: aanscherpen van een diamanttaster (a) en van een diamanten microtoommes (b)

plaats te stoten. Ook de invalshoek is hierbij van belang. Er ontstaat dan een **afnemende ionenbewerking**. Hiermee kan men ook bij zeer harde materialen (bijvoorbeeld diamant) scherpe meskanten of punten vervaardigen (zie figuur 6.26).
Het ionenstraalbewerken kent nog een aantal andere varianten voor toepassingen in de micromechanische industrie en in de halfgeleiderindustrie.

6.4.5 Bewerken met lasers

Eigenschappen van lasers voor materiaalbewerking

Bij laserbewerken is de energievorm de laser (een afkorting van *light amplification by stimulated emission of radiation*). De kenmerkende eigenschap van **lasers** is dat ze een **coherente** lichtbundel leveren. Dit is licht met één vaste golflengte, waarbij alle golven met elkaar in fase zijn. Hierdoor treedt geen verstrooiing op. De golflengte is afhankelijk van de in de laser gebruikte actieve stof. De bundel kan continu zijn of gepulst.
In het laatste geval zijn de pulsfrequentie, pulsduur en energie per puls meestal binnen ruime grenzen instelbaar, al hangen de mogelijkheden wel af van de opbouw van de laser. Vooral bij continue lasers is het beschikbare vermogen van groot belang. Bij pulserende lasers is vooral de energie per puls belangrijk, met name wanneer een hoge intensiteit bij een laag vermogen gewenst is. Men kiest dan een lage pulsfrequentie, omdat het vermogen immers gelijk is aan de energie per puls maal de pulsfrequentie.



Figuur 6.27 Focussering van een bundel laserlicht

Bundelmanipulatie

Door optische systemen kan de lichtbundel die de laser levert verder worden gemanipuleerd. In lucht, of beter nog in vacuüm, kan deze bundel zich over grote afstanden voortplanten zonder dat de eigenschappen veranderen. De bundeldiameter neemt nauwelijks toe. Door spiegels kan de lichtbundel in een gewenste richting worden afgebogen. Indien de spiegels gedeeltelijk doorlaatbaar zijn, kan de bundel hiermee worden gesplitst. Door gebruik te maken van lichtgeleiders bestaande uit glasvezelbundels kan het licht om hindernissen heen worden geleid. Met lenzen kan men de lichtbundel op een klein oppervlak concentreren (zie figuur 6.27). De vermogensdichtheid kan zeer hoog zijn. De verdeling van de vermogensdichtheid over de bundeldoorsnede heeft ongeveer de vorm van een Gausskromme (zie figuur 12.7).

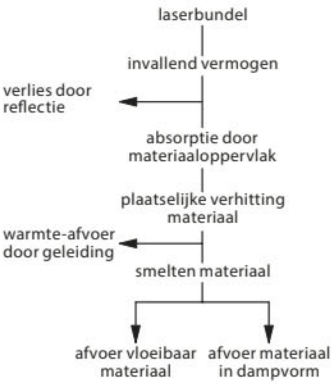
Interactie van de bundel met het werkstuk

Wat er gebeurt als de laserstraal een werkstukoppervlak treft, hangt af verschillende factoren op het gebied van de straal, het werkstuk en de omgeving.
Factoren op het gebied van de straal:
- golflengte;
- vermogensdichtheid;
- verblijftijd.

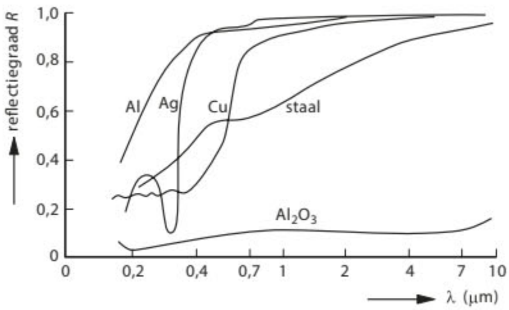
Factoren op het gebied van het werkstuk:
- reflectie;
- thermische eigenschappen;
- overige materiaaleigenschappen.

Factor op het gebied van de omgeving:
- aanwezigheid van een stilstaand of stromend medium.

Laten we eerst eens naar de warmtebalans kijken. Gedurende de **verblijftijd** wordt een bepaald klein oppervlakje van het werkstuk blootgesteld aan de straal met een vermogen P. De straal levert dan de energie $E_0 = P \times t_e$. Een deel van de energie van de straal wordt geabsorbeerd door het werkstukop-



Figuur 6.28 Energiestromen wanneer een bundel laserlicht een werkstukoppervlak treft

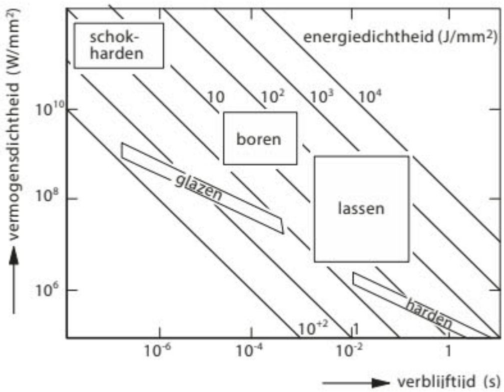


Figuur 6.29 De reflectie van laserlicht als functie van de golflengte λ voor verschillende materialen

pervlak, en de rest wordt teruggekaatst (zie figuur 6.28). Van belang zijn de **absorptiegraad** A of de **reflectiegraad** R ($R = 1/A$). Deze zijn afhankelijk van de golflengte van het licht λ (zie figuur 6.29), de eigenschappen van het werkstukmateriaal en het ruwheidsprofiel.

Sommige lasers geven hun energie in pulsen af met daartussen pauzes. Deze lasers noemen we **gepulste lasers**. De energie per puls, de pulsduur en het pulsinterval zijn instelbaar. De pulsduur is gelijk aan de verblijftijd. **Continue lasers** geven een straal af met een instelbaar vermogen. Hierbij wordt de verblijftijd bepaald door de diameter van het bestraalde vlekje op het werkstukoppervlak en de snelheid waarmee dit vlekje over het oppervlak wordt voortbewogen.

Van groot belang is de vermogensdichtheid, oftewel het vermogen per oppervlakte-eenheid van het bestraalde werkstukoppervlak. Bij een lage vermo-



Figuur 6.30 Vermogensdichtheid-verblijftijddiagram voor laserbewerkingen

gensdichtheid is er veel tijd nodig om een bepaalde hoeveelheid energie in het werkstuk te brengen. De energie verhit het werkstuk ter plaatse van de straal, maar wordt ook gedeeltelijk door geleiding verdeeld over een groter gebied in het werkstuk. Voor die geleiding is echter tijd nodig. Bij een korte verblijftijd is de hoeveelheid energie die door geleiding wordt afgevoerd dus gering. Men benadert de adiabatische toestand, zoals die in de thermodynamica wordt behandeld. Ter plaatse van de straal treedt een sterke temperatuurverhoging op, maar de omgeving blijft vrijwel koud. Bij een lange verblijftijd wordt de opgenomen energie veel gelijkmatiger over een uitgebreide zone verspreid. Om een sterke temperatuurverhoging te verkrijgen, is dus veel meer opgenomen energie nodig.

Alle thermische bewerkingen berusten op temperatuurverhoging. Afhankelijk van de soort bewerking streeft men naar een hogere temperatuur in vaste toestand, naar smelten of naar verdampen. De absorptie van warmte door vloeistof of damp is vaak veel groter dan die door vaste stof. Daarom kan boven de **kritische vermogensdichtheid** van de straal de absorptiegraad zeer sterk toenemen, soms van minder dan 0,1 tot vrijwel 1,0. Voor veel materialen ligt deze intensiteit bij circa 10^6 W/mm^2. Boven deze waarde is de invloed op de absorptie van de golflengte van het laserlicht, het werkstukmateriaal en het ruwheidsprofiel ineens veel kleiner.
Na het verwarmen door het laserlicht volgt afkoeling. Hoe snel die afkoeling plaatsvindt, hangt samen met de temperatuurgradiënt en de thermische eigenschappen van het werkstukmateriaal.

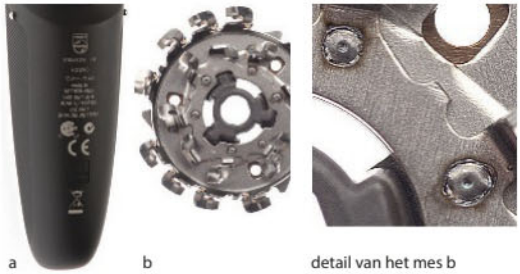
Veel verschijnselen bij thermische processen kan men beschrijven aan de hand van een **vermogensdichtheid-verblijftijddiagram** (zie figuur 6.30).

Mogelijke bewerkingen

We lichten de mogelijke laserbewerkingen toe aan de hand van het diagram uit figuur 6.30.

Boven een bepaalde combinatie van intensiteit en blootstellingsduur wordt het smeltpunt overschreden. Indien het smelten over enige diepte optreedt en men het gesmolten materiaal met een **snijgas** wegblaast, ontstaat ter plaatse een putje. Sommige materialen smelten niet, maar verdampen (sublimeren). Dan is geen snijgas nodig. De aanwezigheid van gas heeft nog een andere functie. Een neutraal gas kan oxidatie van het werkstukoppervlak door lucht uit de omgeving voorkomen. Een reducerend gas kan zelfs aanwezige oxiden weer afbreken. Bij vrijwel alle laserbewerkingen wordt daarom een neutraal of reducerend **beschermgas** toegepast.
Als men de laserstraal lang genoeg op een plaats laat staan, ontstaat er een gaatje. Men spreekt dan van **laserboren**. Als men een laser met de juiste snelheid over het werkstuk beweegt, ontstaat er een snede. Dat is **lasersnijden** (zie ook hoofdstuk 7). De meeste materialen smelten bij het bereiken van een bepaalde temperatuur. Dat gegeven komt van pas bij **lasersmeltsnijden**. Andere materialen gaan direct van de vaste stof over in damp, of het gesmolten materiaal gaat bij nog hogere temperaturen in damp over. Snijden waarbij verdamping optreedt noemt men **sublimeersnijden**. Laserharden, glazen en schokharden bespreken we in paragraaf 10.4.4.

Laserlicht is een energiebron met een zeer laag rendement: slechts enkele procenten. De rest van de toegevoerde energie wordt in de laser zelf omgezet in warmte. Lasers voor materiaalbewerking moeten dan ook intensief worden gekoeld. Daar staat tegenover dat door de nauwe snijspleet en de geringe warmteafvoer naar de omgeving de vereiste netto energie laag is. Sommige materialen, waaronder de meeste staalsoorten, hebben een ontbrandingstemperatuur die lager is dan de smelttemperatuur. Voert men bij een dergelijk materiaal zuivere zuurstof toe aan de verhitte zone, dan treedt verbranding op en smelt het oxide. Men spreekt in dit verband van **laserbrandsnijden**. Bij laserbrandsnijden werkt men vaak met twee gassen: zuurstof als snijgas en een beschermgas om de rest van het werkstuk tegen oxidatie te beschermen.



a b detail van het mes b

Figuur 6.31 Lasergegraveerde teksten en symbolen op (a) en lasergelast mes (b) van de behuizing van het Philips-scheerapparaat

Lasersnijden heeft een belangrijk voordeel: het is erg flexibel. Veel verschillende materialen kunnen ermee worden gesneden. Door het wijzigen van een NC-programma kan de productgeometrie zeer snel worden aangepast. Zelfs dubbelgekromde oppervlakken zijn goed te snijden door gebruik van industriële robots (zie figuur 13.44 en paragraaf 13.9). Men snijdt onder andere autocarrosseriedelen in kleine series voor bijvoorbeeld prototypes en speciale sportmodellen. De bedrijfskosten van lasersnijden zijn relatief hoog door het relatief hoge energiegebruik en de noodzakelijke zuivere gassen. Daardoor blijft de toepassing beperkt tot kleine series. Economisch gezien ligt de grens bij circa 10 mm. Technisch is een grotere dikte mogelijk.

Bij **lasergraveren** wordt het werkstukmateriaal slechts tot een beperkte diepte gesmolten. Met behulp van een numeriek bestuurde lasergraveermachine kan men teksten en figuren rechtstreeks in allerlei materialen aanbrengen. In de spuitgietmatrijs voor een kunststof onderdeel of bewerkingsgereedschap kunnen symbolen en teksten gegraveerd worden. Vaak voert men dit proces uit op materiaal dat is opgebouwd uit lagen met verschillende kleuren, bijvoorbeeld kunststoffen of metaalplaat voorzien van een coating (zie figuur 6.31a). Men vervaardigt hier bijvoorbeeld naamborden en bedieningspanelen mee.

Laserlassen en solderen

Plaats twee onderdelen goed passend tegen elkaar. Laat vervolgens de beide materialen smelten door

de werking van een laserbundel. Laat de onderdelen daarna afkoelen. Zo ontstaat een lasverbinding (zie figuur 6.31b en hoofdstuk 9). Meestal werkt men bij **laserlassen** zonder toevoegmateriaal. Er bestaan verschillende uitvoeringsvormen, zoals overlaplassen, stomplassen, puntlassen en naadlassen (zie hoofdstuk 9). Voor puntlassen gebruikt men lasers die met een lage frequentie pulsen met een hoge energie kunnen afgeven. Voor naadlassen gebruikt men een continue of eventueel een gepulste laser met een hoge pulsfrequentie en een relatief lage energie per puls.

Voordelen van laserlassen zijn:
- er zijn zeer kleine lassen mogelijk (bijvoorbeeld aansluitingen van microchips);
- de las is schoon;
- er treden vrijwel geen krachten op;
- sterk uiteenlopende materialen zijn aan elkaar te lassen.

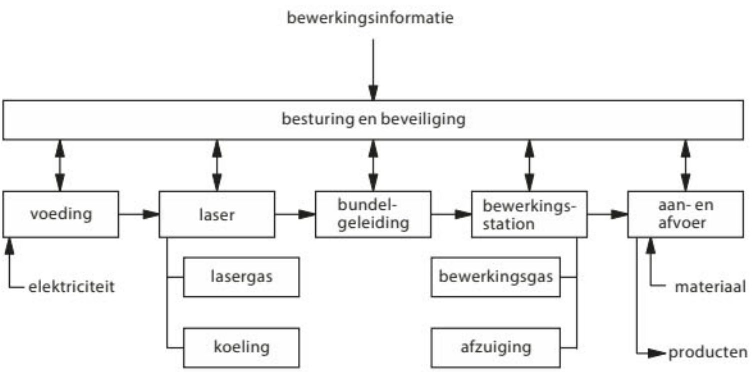
Wanneer men een toevoegmateriaal met een lager smeltpunt dan dat van het werkstukmateriaal gebruikt, en wanneer het basismateriaal niet gesmolten wordt, wordt gesproken van **lasersolderen**. Lasersolderen wordt meestal als overlapverbinding uitgevoerd. Door de lagere temperatuur zijn ook smeltverbindingen aan zeer temperatuurgevoelige onderdelen mogelijk. Daarom wordt het lasersolderen aanmerkelijk minder toegepast dan laserlassen. Een tussenvorm van lassen en solderen is het lassen van metalen met verschillende smeltpunten. Door diffusie van de metalen in elkaar kan een hechte verbinding ontstaan. Het verschil in uitzettingscoëfficiënten blijft wel een probleem.

Lasersystemen voor materiaalbewerking

De toepassing van lasers voor materiaalbewerking neemt nog voortdurend toe. Er zijn veel verschillende laserbewerkingssystemen beschikbaar. Hoe verschillend ze ook zijn, steeds zijn de volgende bouwgroepen te herkennen (zie figuur 6.32):
- de laser zelf met voeding;
- het optische systeem voor de geleiding van het licht naar de werkplek. Dit betreft spiegels of lichtgeleiders. De lichtgeleiders bestaan uit glasvezelbundels en een lenzenstelsel voor de focussering;
- een bewegingsmechanisme voor het verkrijgen van de vereiste relatieve bewegingen tussen de bewerkingskop (bestaande uit de focusseerlens en de spuitkop voor het gas) en het werkstuk, met de vereiste aandrijving en besturing;
- een gasverzorgingssysteem voor de aanvoer van de vereiste soort en hoeveelheid snijgas en/of beschermgas;
- hulpsystemen voor de automatische aan- en afvoer van het materiaal, de werkstukken en het afval, en voor de automatische verwisseling van de bewerkingskop.

6.4.6 Bewerken met elektronenstralen

Er bestaat een grote overeenkomst tussen bewerkingen met een elektronenstraal en met een laser. Bij beide gaat het om stralen die met een magnetische of een optische lens tot een hoge energiedichtheid worden gebundeld op de plaats waar ze het werkstukoppervlak treffen. Daar wordt de energie voor een groot deel omgezet in warmte. De temperatuur in het werkstuk gaat hierdoor omhoog.



Figuur 6.32 Schematische weergave van een laserbewerkingssysteem

Bij **elektronenstraalbewerken** worden de elektronen uitgestoten door de elektronenbron. Daarna moeten ze een hoge snelheid krijgen. Hiervoor is een elektrisch veld nodig. Bij transport door de lucht zouden de elektronen op de aanwezige atomen stoten en daardoor van richting veranderen en vertragen. Daarom moeten ze bewegen in een ruimte met een hoog vacuüm. Ook het werkstuk moet in die ruimte geplaatst zijn. Dat is meteen een groot nadeel van deze techniek. De vacuümruimte moet niet alleen groot genoeg zijn om de werkstukken te kunnen bevatten, maar het kost ook veel tijd om de druk in die grote ruimte laag genoeg te krijgen.
Wanneer de elektronen een werkstukoppervlak met hoge snelheid treffen, wordt de kinetische energie omgezet in thermische energie. Door de elektronenstraal met magnetische lenzen tot een nauwe bundel te focusseren kan men een zeer hoge vermogensdichtheid verkrijgen (10^4 tot 10^{14} W/mm^2). Er treedt plaatselijk een zeer hoge temperatuur op, waardoor het werkstukmateriaal op een zeer klein oppervlak smelt of zelfs verdampt. Op deze wijze kan men enkele duizenden zeer kleine gaatjes boren per seconde. Men kan ook gleuven snijden, door het werkstuk te bewegen en tegelijkertijd een zeer snelle straalbeweging te laten plaatsvinden door sturing van het magnetische veld. Twee nauwkeurig bewerkte onderdelen aan elkaar lassen is ook mogelijk, zelfs als die van sterk verschillende materialen zijn. Dan moet men deze onderdelen tegen elkaar plaatsen en ervoor zorgen dat het werkstukmateriaal wel smelt, maar niet verdampt.

Door de zeer hoge energiedichtheid en de hoge bewerkingssnelheid treedt weinig thermische beschadiging op. Elektronenstraalbewerkingen worden daarom vooral toegepast voor de vervaardiging van hoogwaardige onderdelen in de fijnmechanische industrie. Ook voor hittebestendige onderdelen van vliegtuigmotoren zijn elektronenstraalbewerkingen zeer geschikt. Door de zeer hoge snelheid van de elektronen kunnen ze diep in de spleet tussen twee aaneengesloten onderdelen doordringen. Hierdoor is het lassen van dikke werkstukken (100 mm en meer) goed mogelijk. Door het werken in vacuüm verkrijgt men schone lassen van zeer hoge kwaliteit, zonder thermische vervormingen en met een hoge vermoeiingssterkte. Daarom wordt elektronenstraallassen in sommige gevallen toegepast voor zware, hoogbelaste onderdelen in de machinebouw. Bijvoorbeeld achterassen van vrachtauto's.

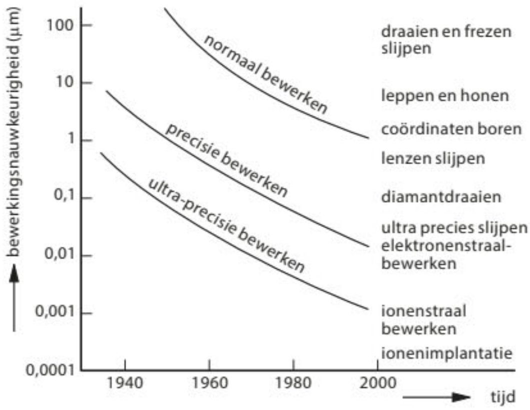
6.5 Toepassingen

In dit hoofdstuk zijn veel zeer uiteenlopende bewerkingstechnieken aan de orde gekomen. Sommige hebben we uitgebreider behandeld dan andere. De praktische betekenis van de beschreven technieken loopt sterk uiteen. Sommige technieken zijn wijd verbreid. Hiertoe behoren zeker het vonkverspanen en de grote groep van laserbewerkingen, waarbij het lasersnijden het meest bekend is. Andere technieken, zoals het elektrochemisch bewerken en het ultrasoon bewerken, komen veel minder frequent voor. Bij ECM ligt dit duidelijk aan de milieu- en corrosieproblemen. Voor ultrasoon bewerken geldt dat de toepassing van materialen die met voordeel bewerkt kunnen worden beperkt is.

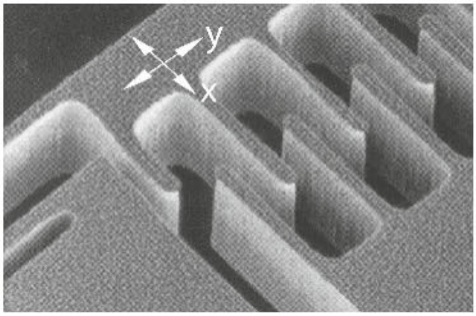
Weer andere technieken, zoals foto-etsen en ionenstraalbewerken, kom je maar zelden tegen in de praktijk. De bedrijven die ze toepassen, beheersen deze technieken echter vrijwel perfect. Je vindt deze bedrijven met name in de micromechanische industrie en de halfgeleiderindustrie. Ze behoren dan ook tot de sleuteltechnologieën die van zeer groot strategisch belang zijn voor de betrokken ondernemingen.

Het aantal toepassingen van fysisch en chemische bewerkingen neemt toe door:
- het gebruik van materialen die met conventionele technieken niet of zeer moeilijk te bewerken zijn;
- de mogelijkheid om zonder productgebonden gereedschap een complexe geometrie te genereren;
- de geschiktheid van sommige technieken voor het vervaardigen van zeer kleine, fragiele of nauwkeurige onderdelen.

Figuur 6.33 toont de ontwikkeling van de haalbare bewerkingsnauwkeurigheid in de periode 1940-2000. De figuur onderscheidt normale bewerkingsmethoden, precisie- en ultraprecisie-bewerkingsmethoden. De grenzen tussen deze categorieën zijn niet scherp. Ze verschuiven bovendien in de loop der jaren naar kleinere toleranties. Ultraprecisiebewerkingen zijn bewerkingen met de hoogst bereikbare nauwkeurigheid op het beschouwde tijdstip. In de meeste werktuigbouwkundige constructies kan men maat-, vorm- en plaatstoleranties nog uitdrukken in tienden en honderdsten van een millimeter. Voor nauwkeurige onderdelen is de micrometer de maatstaf. Het uitdrukken van



Figuur 6.33 De ontwikkeling van de bereikbare bewerkingsnauwkeurigheden



Figuur 6.34 Detail van een XY-tafeltje (Mesa, Universiteit Twente)

toleranties in nog kleinere eenheden is vooral zinvol voor optische en micro-elektronische componenten. Ook in de instrumentenbouw en voor medische toepassingen worden echter voortdurend om nauwkeuriger onderdelen gevraagd. En het betreft dan beslist niet alleen kostbare kapitaalgoederen. Ook in consumentenartikelen, zoals foto- en videoapparatuur en computers, komen steeds vaker uiterst nauwkeurige componenten voor, die toch tegen zeer lage kosten worden geproduceerd.

In het algemeen gaan nauwe toleranties samen met een hoge oppervlaktekwaliteit. Er bestaat echter geen rechtstreeks verband tussen tolerantie en ruwheid. Bij een spiegel is bijvoorbeeld de ruwheid van groot belang en de dikte van weinig belang.

De ondergrens voor bereikbare toleranties en ruwheid is ongeveer 10^{-3} µm = 1 nm. Dat is ongeveer driemaal de roosterafstand in metaalkristallen. Nauwkeuriger dan de roosterafstand kan men niet bewerken, maar wel meten.

Precisie- en ultraprecisie-bewerkingen kan men in principe realiseren met mechanische, fysische én chemische bewerkingsmethoden. Er moet wel zeer veel zorg worden besteed aan de gelijkmatigheid en zuiverheid van de werkstukmaterialen, de kwaliteit van de gereedschappen (bijvoorbeeld de scherpte van snijkanten of de gelijkmatigheid van de grootte van slijpkorrels) en de nauwkeurigheid van de bewegingen van productiemachines. Een aantal bewerkingstechnieken is speciaal ontwikkeld voor het realiseren van uiterst kleine afmetingen met zeer hoge nauwkeurigheid. Deze technieken vallen onder de **submicrontechnologie** of zelfs onder de **nanotechnologie**. Met een aantal van deze technieken zijn zelfs zeer kleine aantallen atomen te verwijderen, aan te brengen of te verplaatsen. We noemen dit **atomic-bit-machining**. Het is opmerkelijk dat het op deze schaal vaak weer gaat om mechanische processen, waarbij uiterst kleine deeltjes (tot atomen en ionen aan toe) als gereedschap dienen om de geometrie van het werkstuk te wijzigen. Het gaat te ver om deze zeer geavanceerde en zeer gespecialiseerde bewerkingen hier te behandelen, al is het bewerken met ionen in paragraaf 6.4.4 kort aan de orde gekomen.

Het vakgebied **micromechanica** omvat het ontwerpen en vervaardigen van uitermate kleine, overwegend mechanische constructies. Daarbij gebruikt men bij voorkeur zeer zuivere, goed gedefinieerde en stabiele materialen, zoals kwarts en vooral silicium. De bewerkingstechnieken zijn afkomstig uit de halfgeleiderindustrie. De afnemende technieken zijn verfijnde varianten van het foto-etsen. Daarnaast gebruikt men technieken voor het plaatselijk aanbrengen van lagen door opdampen en microverbindingstechnieken.
Voorbeelden van toepassingen zijn vooral te vinden in de ontwikkeling van sensoren (voor de omzetting van een fysische grootheid in een elektrisch signaal), bij zeer kleine instrumenten en in de medische techniek. Als voorbeeld hebben we in figuur 6.34 een XY-tafeltje weergegeven met een maximale verplaatsing van 50x50 µm en een resolutie van circa 100 nm. Dit onderdeel wordt gemaakt uit silicium en wordt toegepast in moderne magnetische recorders.

Het vakgebied van de **nanofabricage** reikt nog verder in het kleine. Het gaat hier om afmetingen ter

grootte van moleculen en atomen. Op deze schaal gedragen materialen zich heel anders dan we tot dusver hebben beschreven. De ontwikkeling van materialen met bijzondere eigenschappen speelt hier dan ook een belangrijke rol. Dit gebied duiden we voornamelijk aan met de term nanotechnologie. De geometrie van de producten is hierbij in het algemeen van minder belang.
Voor andere producten gaat het juist wel om de geometrie. In dat geval spreekt men van nanofabricage. Hierbij is geen sprake van bewerkingen in de klassieke zin van het woord. In de nanofabricage gaat het ontstaan van het materiaal meestal samen met de vormgeving daarvan, op een schaal die zeer veel kleiner is dan 1 µm. De betreffende technieken komen gedeeltelijk voort uit de chipfabricage en de materiaalaangroeitechnieken (zie hoofdstuk 8) en zijn nog volop in ontwikkeling. Op deze schaal overheersen andere verschijnselen dan in de klassieke werktuigbouw.

Alle nanobewerkingstechnieken hebben met elkaar gemeen dat zij een zeer zorgvuldige procesvoering vereisen met positioneernauwkeurigheden in de orde van 10^{-3} µm en een geconditioneerde ruimte. Elke vorm van verontreiniging moet worden voorkomen. De producten die men op deze wijze vervaardigt hebben bijzondere eigenschappen en worden meestal aangebracht op een drager van een ander materiaal. Voor de kwaliteitsbeheersing zijn zeer verfijnde observatie- en meettechnieken vereist. De meeste voorwerpen in deze orde van grootte zijn star. Het is echter ook mogelijk beweegbare constructies te vervaardigen, zoals hefbomen, veren, rotoren en tandwielen.

Samenvatting

In dit hoofdstuk hebben we een aantal fysisch en chemische bewerkingsmethoden samengebracht. Bekende en minder bekende.

Zinkvonken en elektrochemisch frezen berusten beide op vormomkering: de resulterende vorm is het negatief van het gereedschap. Daardoor is het mogelijk moeilijke vormen te realiseren, zo nodig in combinatie met complexe bewegingen van het gereedschap. Het fysisch principe van deze processen is echter geheel verschillend: vonken vindt plaats in een isolerend medium, oplossen in een geleidend medium. Draadvonken maakt het mogelijk zonder productgebonden gereedschap complexe vormen te maken door middel van snijden door de volle dikte van het materiaal.
De straalbewerkingen kenmerken zich door een hoge tot zeer hoge vermogensdichtheid. Bij deze processen treft de energiedrager het werkstukoppervlak met hoge snelheid. Afhankelijk van het werkstukmateriaal en de procescondities is het mogelijk met deze processen het materiaaloppervlak te beïnvloeden, materiaal te verwijderen of verbindingen tot stand te brengen.

De grondslagen van de behandelde bewerkingen zijn betrekkelijk eenvoudig. Het is echter lastig de basisprocessen zodanig te beheersen dat de gewenste werkstukkwaliteit vrijwel zeker verkregen wordt.

De meeste niet-mechanische processen hebben gemeenschappelijk dat ze niet beïnvloed worden door de hardheid van het werkstukmateriaal en dat er geen (of slechts zeer lage) krachten op het product uitgeoefend worden. Dit is van doorslaggevend belang voor de toepassingsmogelijkheden. De kosten van niet-conventionele bewerkingen zijn hoger. Daarom worden ze in het algemeen alleen toegepast wanneer de conventionele technieken geen goede oplossingen bieden.

Hier en daar hebben we een blik in de toekomst geworpen. We bespraken in het bijzonder de micromechanica en de nanotechnologie, vakgebieden waarin het voortbrengen van producten met uiterst kleine afmetingen centraal staat.

Literatuur

6.1 Kalpakjian S., Schmid S.R., *Manufacturing Engineering and Technology*, 7th edition, Pearson, 2014, ISBN 978-0133128741. Hoofdstuk 20 'Rapid-prototyping processes and operations'; hoofdstuk 27 'Advanced machining processes and equipment'; hoofdstuk 28 'Fabrication of microelectronic devices'; hoofdstuk 29 'Fabrication of microelectro-mechanical devices and systems and nanoscale manufacturing (MEMS)'.

6.2 Groover M.P., *Principles of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems*, 5th edition, John Wiley & Sons Inc., 2013, ISBN: 978-1-118-47140-1. Hoofdstuk 24 'Nontraditional machining and thermal cutting processes'.

6.3 El-Hofy H.A., *Advanced Machining Processes: Nontraditional and Hybrid Machining Processes*, McGraw-Hill, 2005, ISBN 978-0-071-45334-9.

6.4 Zinkvonkerosie, begrippen, technologie en machinekenmerken, *Voorlichtingsbladen voor de metaalindustrie*: VM 76, uitgave FME-CWM.

6.5 Draadvonkerosie, *Voorlichtingsbladen voor de metaalindustrie*: VM 77, uitgave FME-CWM.

6.6 Numeriek bestuurd zinkvonken, *Voorlichtingsbladen voor de metaalindustrie*: VM 79, uitgave FME-CWM.

6.7 Laserbewerkingen, *Voorlichtingsbladen voor de metaalindustrie*: VM 80, uitgave FME-CWM.

Oefenvragen

6.1 Welke eigenschappen zijn gewenst voor het maskermateriaal bij het foto-etsen?

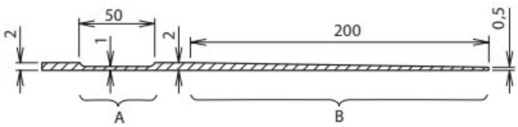
6.2 Vergelijk de mogelijkheden van vonkverspanen met die van elektrochemisch bewerken wat betreft bewerkbaarheid en nauwkeurigheid.

6.3 Hoe komt het dat men laserstralen kan toepassen voor zulke uiteenlopende materiaalbewerkingen?

6.4 Men wil het product uit de bijgaande figuur vervaardigen door chemisch frezen. De etssnelheid bedraagt 1 µm/s.

a Hoelang moet het onderdeel in het etsbad verblijven voor het vervaardigen van detail A?

b Met welke snelheid moet het onderdeel uit het etsbad getrokken worden voor het vervaardigen van detail B?

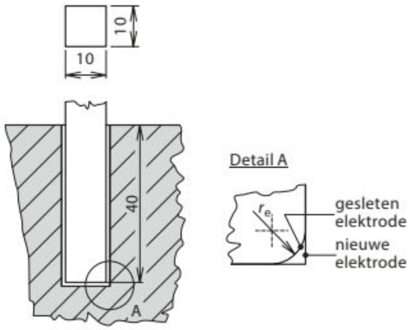


Figuur bij oefenvraag 6.4

6.5 Bij een bepaalde instelling van een vonkverspaningsmachine bedraagt de ontladingsfrequentie 100 kHz met een energie per puls $E_p = 60$ mJ. De materiaalafnamesnelheid Q_w bedraagt 0,5 mm^3/s.
De doorsnede van de elektrode is een vierkant met een ribbe van 10 mm.
De volumetrische elektrodeslijtage V_e bedraagt 2% van het volume van het afgenomen werkstukmateriaal V_w. Deze volumeafname is geheel geconcentreerd op de oorspronkelijke scherpe hoeken aan de overgang van de onderzijde naar de zijvlakken van de elektrode.
Er moet een gat van 40 mm diep gevonkt worden.
Bij het beantwoorden van de onderstaande vragen hoef je geen rekening te houden met de breedte van de vonkspleet.

Bereken:

a De volumeafname van het werkstuk per puls q_w.
b De specifieke pulsfrequentie f', dat is de pulsfrequentie per mm^2 actief elektrodeoppervlak.
c De benodigde tijd om het gat te vonken.
d De grootte van de afrondingsstraal r_e van de elektrode na het vonken van het gat.
e De specifieke energie, de energie per mm^3 afgenomen materiaal: e'.



Figuur bij oefenvraag 6.5

inclusief website!

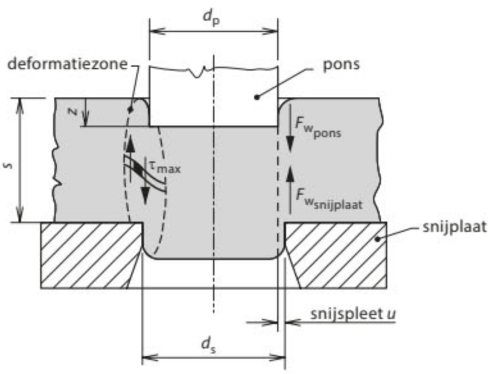
Op www.industrieleproductie.nl vind je de antwoorden op deze vragen, maar ook extra studie- en oefenmateriaal, zoals video's en meer opgaven.

7 Scheiden

Dit hoofdstuk behandelt de scheidende bewerkingen. Deze bewerkingen worden meestal toegepast op plaat- en stafmateriaal. Onder scheiden verstaan we: het verwijderen van materiaal zonder de structuur ervan te veranderen. Het restmateriaal blijft hierbij in principe bruikbaar.
Er zijn verschillende vormen van scheidende bewerkingen. In dit hoofdstuk bespreken we achtereenvolgens de mechanische, niet-verspanend scheidende bewerkingen, de mechanische, verspanend scheidende bewerkingen en enkele fysisch scheidende bewerkingen.
De mechanische, niet-verspanend scheidende bewerkingen zijn knippen, ponsen en uitsnijden (stansen). Hierbij komen de technologie (het deformatieproces), de benodigde machines en gereedschappen en de toepassingen aan de orde.
Vervolgens worden de mechanische, verspanend scheidende bewerkingen besproken. Dit zijn zagen, doorslijpen en omtrekfrezen. De technologie blijft hierbij buiten beschouwing (zie hiervoor hoofdstuk 5). Wel kijken we naar zaagbreedte en nauwkeurigheid.
Ten slotte behandelt het hoofdstuk fysisch scheidende bewerkingen: brandsnijden, plasmasnijden, lasersnijden, draadvonken en waterstraalsnijden. Ook hier gaat het vooral om de toepassingen. Over de technologie van deze bewerkingen kun je meer lezen in hoofdstuk 6.

7.1 Mechanische, niet-verspanend scheidende bewerkingen

Onder mechanische, niet-verspanend scheidende bewerkingen vallen knippen, ponsen en uitsnijden (stansen). Bij deze bewerkingen is een grote variëteit aan vormen en afmetingen van producten mogelijk. Ze worden toegepast voor zeer uiteenlopende plaatdelen: van onderlegringen tot onderdelen van autocarrosserieën. Allereerst bespreken we de technologie van het deformatieproces dat wordt uitgeoefend bij deze mechanische, niet-verspanend scheidende bewerkingen. Omdat dit deformatieproces bij de verschillende bewerkingen hetzelfde is, bespreken we hier één proces uit de groep, namelijk het ponsen van een rond gat (paragraaf 7.1.4). Hierbij komen ook de optredende krachten en de kwaliteit van de gesneden rand aan de orde.
Daarna volgt een aparte beschrijving van elk van de bewerkingen en de bijbehorende gereedschappen en machines.



Figuur 7.1 Het ponsproces

7.1.1 Het deformatieproces

Het **ponsen** wordt getoond in figuur 7.1 en knippen in figuur 7.4. Het deformatieproces vindt plaats in een smalle zone langs de omtrek van snijder en snijplaat. In deze zone vindt eerst elastische en daarna plastische vervorming plaats. Vervolgens treedt er een plotselinge breuk op; de plaatdelen zijn nu van elkaar gescheiden.

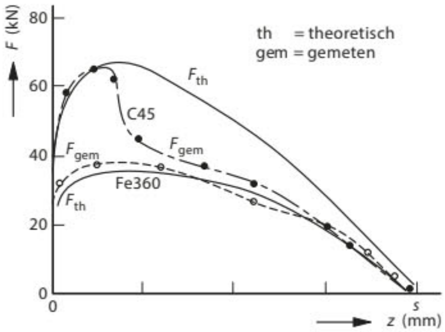
De maximale waarde van de theoretische **ponskracht** als gevolg van het afschuifproces kan als volgt worden weergegeven:

$$F_{th} = \tau \times l \times s$$

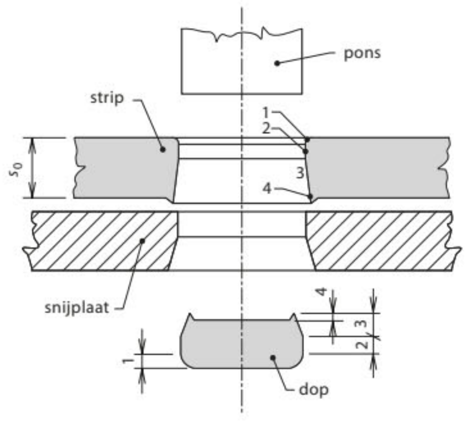
Hierin is τ de schuifsterkte (in MPa) van het werkstukmateriaal; wanneer deze niet bekend is, kun je 0,75 à 0,8 maal de treksterkte nemen. Verder is l de lengte van de snijlijn en s de plaatdikte (beide in mm). In figuur 7.1 is

$$l = \pi \times (d_s + d_p)/2$$

Bovenstaande formule geeft een grove benadering van de theoretische ponskracht. In de praktijk is de ponskracht niet alleen afhankelijk van het werkstukmateriaal, maar ook van de ponssnelheid en de optredende wrijving.
Figuur 7.2 geeft een kracht-wegdiagram voor ponsen weer. Voor de staalsoorten Fe360 en C45 worden zowel het theoretische als het gemeten krachtverloop weergegeven. Behalve door de materiaaleigenschappen wordt de vorm van het kracht-wegdiagram ook beïnvloed door de scheurvorming, de wrijving, de ponssnelheid en de breedte van de **snijspleet** u, met $u = (d_s - d_p)/2$. In de figuur is te zien dat voor C45 het moment van scheurvorming zo vroeg optreedt dat het theoretisch maximum niet wordt bereikt.



Figuur 7.2 Kracht-wegdiagram voor het ponsen van Fe360 en C45



Figuur 7.3 Vervorming- en breukzones bij een geponst product

7.1.2 Kwaliteit van de gesneden rand

Het gesneden oppervlak bestaat voor een deel uit een glad gesneden oppervlak en voor een deel uit een breukvlak. Op het gesneden oppervlak kunnen de volgende gebieden worden onderscheiden (zie figuur 7.3):
- afronding van plaat en dop (glad, nr. 1 in de figuur)
- afschuif- of snijzone (glad, nr. 2 in de figuur)
- breukzone (nr. 3 in de figuur)
- braam (nr. 4 in de figuur)

De belangrijkste factor die de vorm en de kwaliteit van de gesneden rand bepaalt, is de snijspleet (zie figuur 7.1). De gebruikelijke snijspleet varieert tussen 2 en 10% van de plaatdikte, afhankelijk van het werkstukmateriaal. Als de grootte van de snijspleet toeneemt, worden de randen ruwer en wordt de **deformatiezone** groter. Het materiaal wordt in de snijspleet gedrukt en de randen van de gesneden zone worden steeds meer afgerond. Als de snijspleet te groot is, wordt het plaatmateriaal gebogen en onderworpen aan trek- in plaats van aan schuifspanningen. Des te groter de snijspleet, des te hoger de gevormde braam. De braam wordt ook hoger als de ductiliteit van het materiaal groter is, en wanneer stomp gereedschap wordt gebruikt. Een te kleine snijspleet leidt tot te grote ponskrachten, sterke gereedschapslijtage en kans op gereedschapbreuk, doordat snijder en snijplaat elkaar raken.

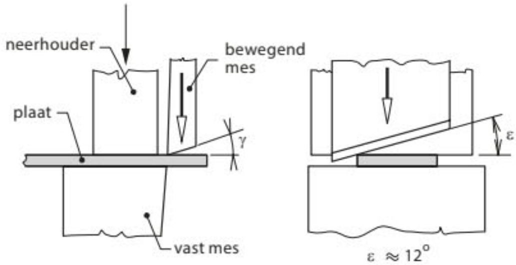
De verhouding tussen het gladde oppervlak en het breukvlak op het gesneden oppervlak neemt toe naarmate de ductiliteit van het werkstukmateriaal groter is. Als de materiaaldikte toeneemt en de snijspleet groter is, neemt deze verhouding juist af. De weg die de snijder af moet leggen om het afschuifproces te completeren, neemt toe naarmate de (schuif)rek groter is. De (schuif)rek is de rek die het materiaal kan ondergaan voordat er breuk optreedt. Bij brosse materialen (materialen met een lage breekrek, zie ook paragraaf 2.3.1) kunnen bij knippen

en ponsen kleine scheurtjes ontstaan. Bij wisselende belastingen op het product kunnen vervolgens vermoeiingsscheuren optreden. Brosse materialen mogen daarom alleen geknipt en geponst worden als voorbewerking, een nabewerking dient dan nog te volgen. Dit speelt bijvoorbeeld een rol in de productie van de meeste vliegtuigonderdelen.

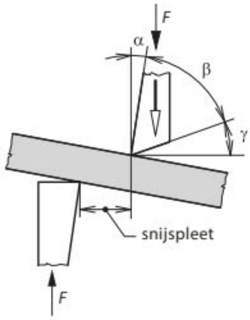
7.1.3 Knippen

Knippen is een spaanloos snijdende bewerking, waarbij het snijvlak van een van de beide gereedschapsdelen (messen) een hoek γ maakt met het vlak van de plaat. Deze hoek is de **snijhoek**. Knippen geschiedt meestal langs rechte lijnen, maar kan ook langs gebogen lijnen plaatsvinden. Bij knippen is er nooit sprake van productgebonden gereedschap (bij een productgebonden gereedschap ligt de informatie over de vorm van het product meestal vast in de vorm van het gereedschap). Het principe van de bewerking is weergegeven in figuur 7.4.

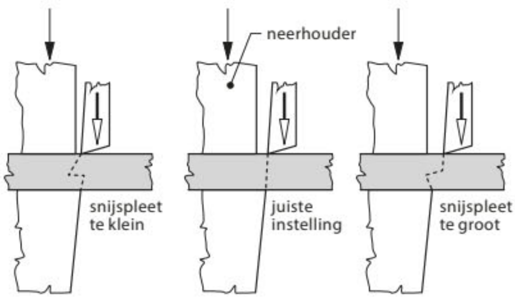
Tijdens het knippen wordt er een moment (=koppel) uitgeoefend dat de plaat wil doen kantelen. De neerhouder zorgt ervoor dat dit niet kan gebeuren. Aan de messen is een vrijloophoek α van 1° à 3° aangebracht (zie figuur 7.5). Hierdoor wordt de wrijving tussen het plaatmateriaal en de messen verminderd. De snijhoek γ dient ervoor om de snijkrachten te verkleinen en om het buigend moment dat tijdens het knipproces optreedt op de plaat te beperken. Om toch een redelijke **standtijd** (de levensduur tot herslijpen noodzakelijk is) van de messen te kunnen realiseren, wordt een wighoek β van 70° à 80° aangehouden; hiermee verkrijgt het mes een zekere vormstabiliteit. De speling (snijspleet) tussen de messen is afhankelijk van de plaatdikte en ligt op ongeveer 5%. De vorm van het snij- en breukvlak wordt, evenals bij ponsen, bepaald door de grootte van de snijspleet en de ductiliteit, de (schuif)rek en de dikte van het werkstukmateriaal. Bij het bepalen van de speling tussen de messen is het belangrijk om ervoor te zorgen dat de scheurvorming vanuit beide snijkanten langs dezelfde rechte lijn verloopt (zie figuur 7.6). Vooral de **kniphoek** ε (zie figuur 7.4) zorgt voor een geleidelijke intrede van het bewegend mes in het werkstukmateriaal, en daarmee voor een reductie van de snijkracht. Om te voorkomen dat de plaat door het schuin geplaatste mes wordt weggedrukt, mag de kniphoek ε niet te groot zijn. Een gangbare waarde is 12°.



Figuur 7.4 Knippen



Figuur 7.5 Kantelen van de plaat

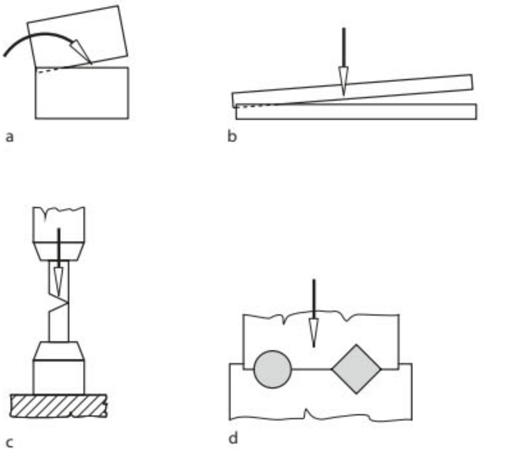


Figuur 7.6 Invloed van de snijspleet op de scheurvorming

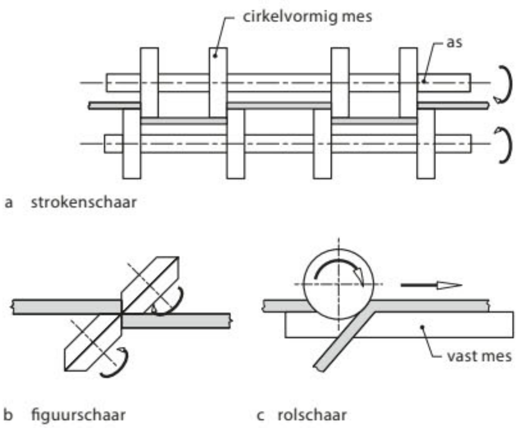
Gereedschappen en machines

Afhankelijk van de vorm en de afmetingen van de snijlijn kunnen verschillende schaarconstructies worden toegepast. De belangrijkste schaartypen zijn de slagschaar, de draaischaar en de rolschaar. Deze worden hieronder besproken. De slagscharen en de draaischaren kunnen verder worden onderverdeeld in verschillende typen.

Slagscharen zijn scharen met langs elkaar bewegende rechte messen, waarvan de beweging zowel rechtlijnig als scharnierend kan zijn. Hierbij kunnen de volgende typen worden onderscheiden (zie figuur 7.7):



Figuur 7.7 De verschillende typen slagschaar: plaatschaar (a), guillotineschaar (b), knabbelschaar (c) en knuppelschaar (d)



Figuur 7.8 Draaischaren (a,b) en rolschaar (c)

- **Plaatschaar**: een slagschaar met korte, scharnierende messen, geschikt voor het knippen van kleine plaatdelen.
- **Guillotineschaar**: een slagschaar met lange messen die een rechtlijnige beweging maken. Deze wordt toegepast om grote platen in rechthoekige stukken te knippen.
- **Knabbelschaar**: een slagschaar met zeer korte messen. Deze schaar is geschikt voor het knippen (knabbelen) van (bij benadering) gebogen snijlijnen. Bij deze bewerking wordt de gebogen snijlijn gerealiseerd door besturing van de gereedschapbaan in plaats van door de vorm van het gereedschap.
- **Knuppelschaar**: een slagschaar met korte messen, waarvan de vorm van de snijkant is aangepast aan de dwarsdoorsnede van het aangevoerde (staf) materiaal.

Draaischaren zijn scharen met draaiende cirkelvormige messen. Voorbeelden hiervan zijn (zie figuur 7.8):
- **Strokenschaar:** een draaischaar met messen gemonteerd op assen evenwijdig aan het vlak van de te knippen plaat. De strokenschaar snijdt een brede plaat in smallere stroken.
- **Figuurschaar:** een draaischaar met messen gemonteerd op assen die een hoek maken met het vlak van de plaat. Met deze schaar kan men (met handbesturing) willekeurige contouren snijden.

Rolscharen zijn scharen voorzien van één of meer gebogen of rechte vaste messen waarlangs één of meer cirkelvormige messen rollen (zie figuur 7.8).

7.1.4 Ponsen en uitsnijden (stansen)

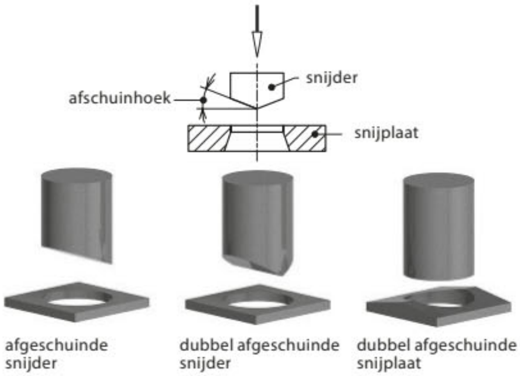
Ponsen is een snijdende bewerking met een gesloten snijlijn voor het maken van een inwendige werkstukbegrenzing. Bij **uitsnijden** (ook wel **stansen** genoemd) gaat het om de uitwendige werkstukbegrenzing. De minimale dambreedte is hierbij essentieel en wordt daarom hieronder apart besproken. Daarnaast kijken we naar fijnstansen, een vorm van uitsnijden.

Het ponsen van ronde gaten wordt in de serie- en massafabricage toegepast als een goedkoop alternatief voor de verspanende bewerking boren. Behalve ronde gaten worden ook veel niet-ronde gaten geponst, bijvoorbeeld vierkante en ovale. Het spreekt voor zich dat ponsgereedschap vorm- en maatgebonden is. De vorminformatie is geheel vastgelegd in het gereedschap.

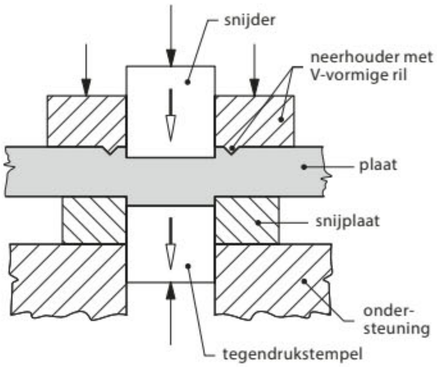
Als het ondervlak van de snijder en het bovenvlak van de snijplaat vlak zijn, bereikt de ponskracht zeer snel een hoge waarde. Om dit te voorkomen worden deze vlakken vaak afgeschuind. Dit kan op verschillende manieren worden uitgevoerd (zie figuur 7.9). Deze afschuining vervult dezelfde functie als de kniphoek ε in figuur 7.4.

Minimale dambreedte

Als er producten uit een plaat worden gesneden, is het zaak dat het overblijvende deel voldoende stevig-



Figuur 7.9 Afgeschuind ponsgereedschap



Figuur 7.11 Fijnstansen

heid bezit. Met andere woorden: de overblijvende verbindingsdammen moeten een bepaalde minimale breedte hebben. Dit is belangrijk, omdat:

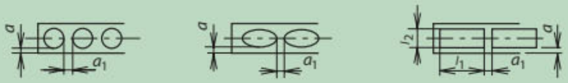
- de dammen niet mogen breken als de snijplaat erop drukt;
- het overblijvende materiaal niet in het gat van de snijplaat mag gaan zitten;
- het overblijvende materiaal geen bramen mag veroorzaken;
- het materiaal de handen van de bediener niet mag verwonden.

Hieruit concludeer je wellicht dat de dammen zo breed mogelijk moeten zijn. Dit levert echter natuurlijk veel materiaalverlies op, en mogelijk ook beperkingen in de vormgevingsmogelijkheden. Het is niet mogelijk om een analytische formule op te stellen voor de minimale dambreedte. De waarden hiervan zullen daarom experimenteel bepaald moeten worden. In figuur 7.10 vind je een aantal van deze experimenteel bepaalde waarden terug.

Fijnstansen

Een bijzondere vorm van uitsnijden is **fijnstansen**. Hierbij wordt het werkstukmateriaal (strip, band) op de snijplaat gedrukt door een **neerhouder** met een V-vormige ril. Deze maakt een indrukking in de plaat, zodat deze niet buigt en in de snijspleet gedrukt wordt, zoals bij ponsen het geval is (zie figuur 7.11). Door fijnstansen kunnen producten met zeer gladde en zuiver haakse wanden verkregen worden. Hetzelfde proces kan ook worden uitgevoerd voor binnencontouren, dan heet het **fijnponsen**.

Bij het fijnstansproces bedraagt de snijspleet ongeveer 1 procent van de plaatdikte, die doorgaans tussen 0,1 en 5 mm ligt. De bewerking wordt over het algemeen uitgevoerd op een drievoudig werkende ('*triple-action*') hydraulische pers, waarbij de krachten die worden uitgeoefend door de neerhouder, het tegendrukstempel en de beweging van de snijder



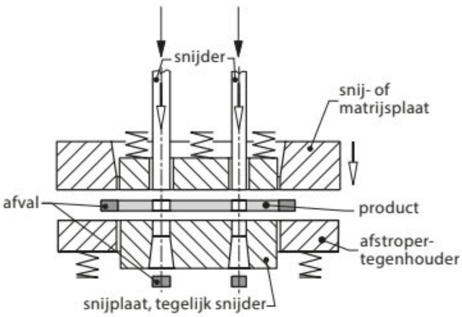
Plaatdikte s (mm)	Cirkelvormige en ovale gaten		Rechthoekige gaten, geldt voor de grootste van de twee (l_1 of l_2)									
			< 50		50 - 100		100 - 200		200 - 300		> 300	
	a	a_1	a	a_1	a	a_1	a	a_1	a	a_1	a	a_1
< 0,5	1,5	1,0	2,5	2,0	2,5	2,0	3,0	2,5	3,5	3,0	4,0	3,5
0,5 - 1,0	1,5	1,0	2,0	1,5	2,0	1,5	2,5	2,0	3,0	2,5	3,5	3,0
1,0 - 1,2	1,8	1,2	2,0	1,5	2,0	1,5	2,5	2,0	3,0	2,5	3,5	3,0
1,2 - 1,5	2,0	1,5	2,0	1,5	2,5	2,0	2,5	2,0	3,0	2,5	3,5	3,0
7,0 - 8,0	5,5	4,5	6,0	5,0	6,5	5,5	7,0	6,0	7,0	6,0	7,5	6,5

Figuur 7.10 Experimenteel bepaalde waarden voor de minimale dambreedte (in mm)

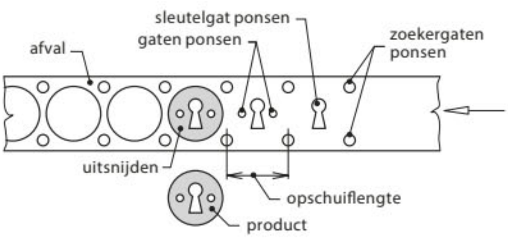
onafhankelijk van elkaar worden geregeld. Het gereedschap en de machine die worden gebruikt bij fijnstansen zijn aanzienlijk duurder dan bij het 'gewone' uitsnijden. Fijnstansen wordt gebruikt in de massafabricage van kleine, nauwkeurige producten, zoals tandwieltjes en nokschijfjes.

Gereedschappen en machines

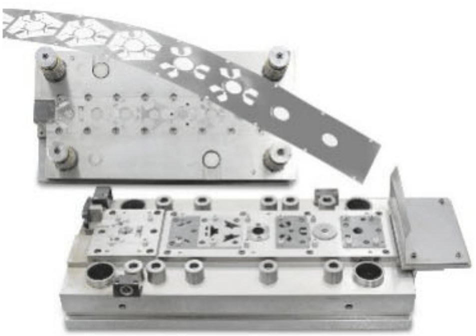
Afhankelijk van de grootte en vorm van het product en van de seriegrootte worden ponsen en uitsnijden op verschillende manieren toegepast. We onderscheiden hier ponsen en uitsnijden met een compleetstempel en met een volgstempel. Vervolgens behandelen we een revolverponsmachine.



Figuur 7.12 Compleetstempel



Figuur 7.13 Product vervaardigd met volgstempel



Figuur 7.14 Onder- en bovenmatrijs met strook voor de *holder spring* van het Philips-scheerapparaat

Compleetstempel

Een productgebonden **compleetstempel** (zie figuur 7.12) voert het ponsen en uitsnijden van een bepaald product met gaten in één beweging uit. De snijder voor de omtrek van het product fungeert tegelijkertijd als snijplaat voor de gaten. De verende elementen dienen als uitwerper/afstroper om het product en het afval te kunnen afvoeren. Het resultaat is een uitgesneden vorm met één of meer gaten.

Deze methode is geschikt voor betrekkelijk eenvoudige producten die in middelgrote of grote aantallen gemaakt worden. Voor betrekkelijk kleine aantallen bestaat het uitgangsmateriaal meestal uit losse, rechthoekig geknipte **blenks**, die met de hand in het stempel worden gelegd. Bij grotere series bestaat dit uit een smalle strook, die vanaf een rol wordt ingevoerd.

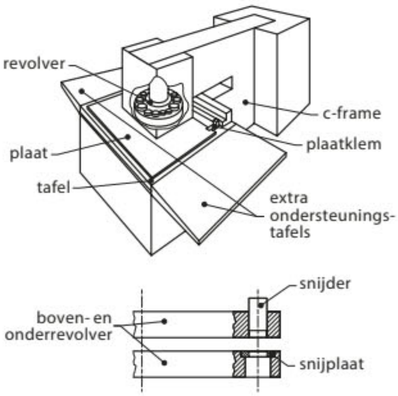
Volgstempel

Een **volgstempel** voert een aantal bewerkingen na elkaar uit. Het kan hier zowel om scheidende als om omvormende bewerkingen gaan. Het materiaal, in de vorm van een strook, schuift na elke slag een vaste afstand door. Nauwkeurig aanhouden van deze opschuiflengte is mede bepalend voor de nauwkeurigheid van het product. In het laatste station van het volgstempel wordt het product losgesneden. Figuur 7.13 toont de bewerkingsstappen. In figuur 7.14 zie je een voorbeeld van een product dat met behulp van een volgstempel wordt gemaakt. Het betreft de zogenaamde *holder spring* van een scheerapparaat.

Een volgstempel is een complex en kostbaar gereedschap. De methode is daarom alleen geschikt voor complexe producten die in grote series worden vervaardigd.

Revolverponsmachine

De **revolverponsmachine** werkt zo veel mogelijk met standaardponsgereedschappen. Om het gereedschap snel te kunnen verwisselen, worden verschillende ponsgereedschappen in een roterende gereedschaphouder, de **revolver**, opgenomen (zie figuur 7.15 en 7.16, en ook hoofdstuk 13). Omdat

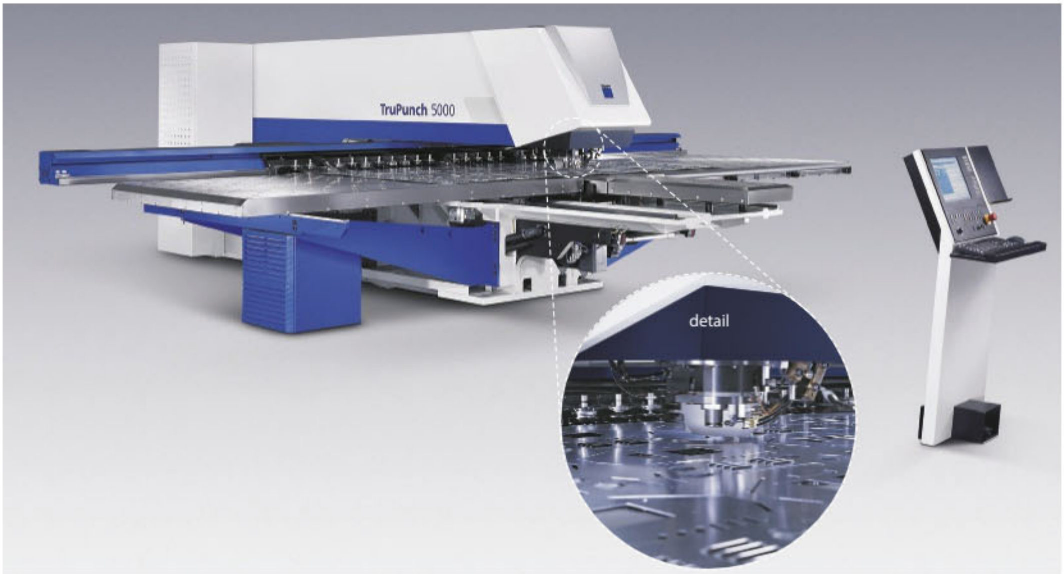


Figuur 7.15 Schets van een revolverponsmachine plus detail van het ponsgereedschap

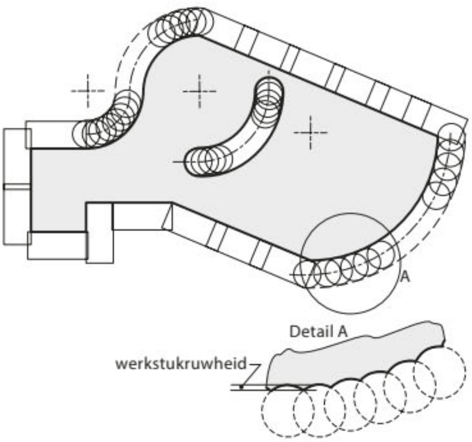
elk ponsgereedschap uit een snijder en een snijplaat bestaat, zijn er steeds twee revolvers. Het gewenste ponsgereedschap kan hiermee snel en eenvoudig in de werkpositie worden gebracht. Na elke ponsslag verplaatst de machine het product. Op deze wijze kunnen gecompliceerde gatenpatronen worden gemaakt. Eén stempel kan verschillende gatvormen (contouren) maken door een gat in meer dan één slag uit te ponsen. Met een vierkant stempel kan men zo bijvoorbeeld ook een rechthoekig of L-vormig gat ponsen. Men kan ook meer dan één stempel voor één gat gebruiken. Bij sommige machines is het daarnaast mogelijk de stempels te roteren en daarmee de oriëntatie van een gat te wijzigen. Ook is soms een combinatie van snijden en omvormen mogelijk, bijvoorbeeld voor het maken van ventilatiesleuven.

Bij het revolverponsen zijn willekeurig gekromde omtrekken te maken door middel van **knabbelen**. Hierbij voert een stempel een groot aantal slagen uit, terwijl het product steeds een kleine verplaatsing ondergaat. De stempeldiameter en stapgrootte bepalen de ruwheid van de gesneden contour. Het aantal slagen bedraagt maximaal circa 10 slagen per seconde. Met een verplaatsing van 5 mm per slag betekent dit een voedingssnelheid van 0,05 m/s.

De verplaatsingen van de plaat werden in het verleden gestuurd met behulp van sjablonen. Tegenwoordig zijn vrijwel alle revolverponsmachines uitgerust met een numerieke besturing (zie hoofdstuk 13 en met name paragraaf 13.8). De besturing verzorgt zowel de verplaatsingen van het product als de gereedschapwisselingen, en eventueel ook het roteren van de gereedschappen (NC-ponsmachine).



Figuur 7.16 De TruPunch 5000-revolverponsmachine (Trumpf)
Besturing: Sinumeriek 840D
Plaatafmetingen: 3.070 × 1.660 mm^2
Plaatdikte: max. 8 mm
Positioneeronzekerheid: 0,1 mm
Ponskracht: max. 220 kN



Figuur 7.17 Geknabbeld product met detail van de ruwheid

Deze methode leent zich voor kleine en middelgrote series. De producten zijn vaak veel groter dan bij compleet- en volgstempels. Het oppervlak van de blenk kan bijvoorbeeld 2 × 1 m bedragen. Zijn de afmetingen van het product kleiner, dan haalt men meer dan één product uit een blenk. Figuur 7.17 illustreert de werkwijze bij het maken van een product waarbij knabbelen wordt toegepast, gedeeltelijk met stapsgewijs roterend gereedschap.

Het NC-pons/knabbelproces heeft verschillende voordelen. De productie is flexibel en ook kleine series zijn mogelijk. De nauwkeurigheid is hoog en de doorlooptijden zijn kort. Een nadeel is de relatief hoge investering voor de machine, die een hoge bezettingsgraad van de machine noodzakelijk maakt.

7.2 Mechanische, verspanend scheidende bewerkingen

De verspanend scheidende bewerkingen voldoen niet geheel aan de definitie van scheiden. Hierbij vindt namelijk spaanvorming plaats, dus een structuurverandering van het materiaal. Het verspaande volume is echter maar een zeer klein deel van het totale volume, en daarom worden deze processen toch tot de scheidende bewerkingen gerekend.

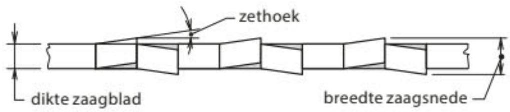
In deze paragraaf zullen achtereenvolgens de toepassingen van de bewerkingen zagen, doorslijpen en omtrekfrezen worden besproken. De technologie wordt in dit hoofdstuk buiten beschouwing gelaten. Hierover vind je meer informatie in hoofdstuk 5.

7.2.1 Zagen

Zagen is een snijdende bewerking, waarbij het snijdende gereedschap (de zaag) is voorzien van een groot aantal kleine tanden. Met deze bewerking kunnen verschillende vormen worden geproduceerd. De vorminformatie ligt hierbij niet opgeslagen in het gereedschap, maar hangt af van de baan die het gereedschap beschrijft ten opzichte van het werkstuk.

Omdat het zaagblad over het algemeen dun is, is het materiaalverlies als gevolg van het zagen gering. Om de wrijving tussen zaag en werkstukoppervlak zo laag mogelijk te houden (dus om klemmen tegen te gaan) zijn de tanden van de zaag gezet onder een bepaalde hoek in twee tegengestelde richtingen (zie figuur 7.18). Dit heeft tot gevolg dat de zaagsnede breder is dan het zaagblad. De zaag kan ook gaan klemmen doordat hij kantelt als gevolg van onvoldoende geleiding. Om dit te voorkomen en om buiging van het zaagblad tegen te gaan, moeten er altijd ten minste drie tanden in aanraking zijn met het werkstuk. Dit is de reden dat het zagen van dunne materialen moeilijk is. Het gebruiken van een zaag met fijnere tanden is dan noodzakelijk.

We onderscheiden verschillende zaagmachines, namelijk de beugelzaag-, de lintzaag- en de cirkelzaagmachine.



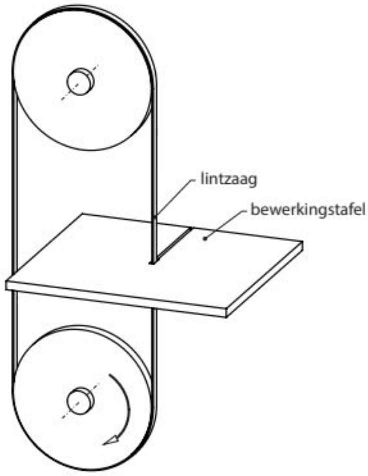
Figuur 7.18 Tandzetting bij zagen



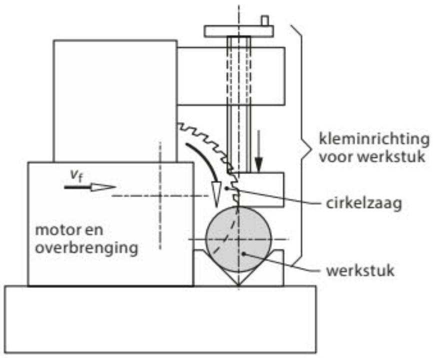
Figuur 7.19 Beugelzaagmachine (AJAX Machine Tools, UK)

De **beugelzaagmachine** (zie figuur 7.19) maakt een rechtlijnige hoofdbeweging. Er wordt hierbij over het algemeen trekkend gezaagd, dus bij de beweging naar rechts. Bij de beweging naar links tilt een hydraulische cilinder de beugel op. Hierdoor wordt de zaag van het werkstuk gelicht. Dit maakt beugelzagen een stuk minder efficiënt dan lintzagen en cirkelzagen. De snijsnelheid is niet constant, omdat de zaag wordt aangedreven door een krukdrijfstangmechanisme. De zaagbladen zijn over het algemeen 1,2 tot 2,5 mm dik. De beugelzaagmachine is vooral geschikt voor het op maat of lengte zagen van stafmateriaal en profielen.

De **lintzaagmachine** (zie figuur 7.20) maakt eveneens een rechtlijnige hoofdbeweging. Deze machine is uitgerust met een lang, smal en flexibel zaaglint. Het zaaglint staat gewoonlijk verticaal, terwijl het werkstuk op een horizontale tafel ligt. De snijsnelheid is constant. Deze machine is geschikt voor het zagen van plaatmateriaal en kan willekeurige vormen uitzagen. Meestal wordt ze met de hand gestuurd, maar numeriek gestuurde lintzaagmachines komen ook voor. De contour kan dan automatisch worden uitgezaagd.
Zoals gezegd is lintzagen efficiënter dan beugelzagen, omdat er bij lintzagen geen niet-verspanende slag is. Met snelstalen bladen kunnen snijsnelheden van ongeveer 0,15 tot 2 m/s bereikt worden.
Een variant op de lintzaag is de **draadzaag**, een met diamantkorrels beklede draad. Hiermee kan men contouren met zeer kleine kromtestralen beschrijven. Bovendien hoeft het product niet te roteren bij het veranderen van de zaagrichting.



Figuur 7.20 Principe van de lintzaagmachine



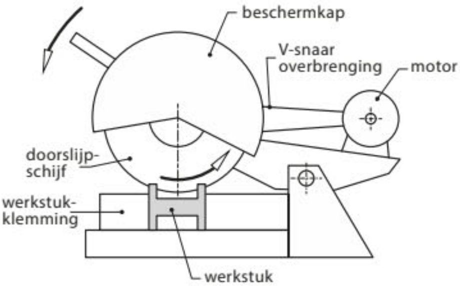
Figuur 7.21 Cirkelzaagmachine

De **cirkelzaagmachine** (zie figuur 7.21) maakt een roterende hoofdbeweging, in tegenstelling tot de bovengenoemde typen. Evenals de beugelzaagmachine is deze machine vooral geschikt voor het op maat zagen van stafmateriaal en profielen. Met een hoge snijsnelheid en voedingssnelheid kunnen grote doorsneden worden doorgezaagd. Door de tanden van hardmetaal te vervaardigen kunnen nog hogere snijsnelheden worden gerealiseerd. Een nadeel is dat cirkelzaagbladen dikker zijn dan lint- of beugelzagen. Het materiaalverlies is dus groter.

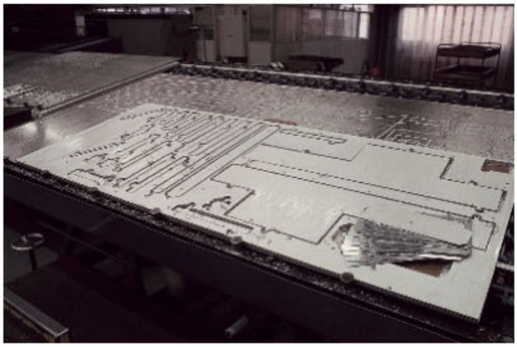
7.2.2 Doorslijpen

Bij het **doorslijpen** is de cirkelzaag vervangen door een smalle slijpschijf (zie figuur 7.22). Het doorslijpen kan zowel droog als nat plaatsvinden. Bij droog slijpen worden snijsnelheden van ongeveer 100 m/s toegepast. Door deze hoge slijpsnelheid zal het materiaal heet worden, en daardoor zacht. Op deze manier kan het materiaal gemakkelijk worden verwijderd. Wanneer het werkstukmateriaal niet (te) warm mag worden, kan men nat slijpen. Hierbij wordt gewerkt met koelvloeistof en rubbergebonden slijpschijven die met een snelheid van ongeveer 50 m/s werken. Een hogere snelheid is niet mogelijk, omdat er dan onvoldoende koelvloeistof op de schijf kan komen en deze oververhit kan raken. In dit geval wordt het door te slijpen werkstukmateriaal niet zacht.

Met doorslijpen kan stafmateriaal worden gescheiden met een diameter tot 50 mm en buismateriaal met een diameter tot 90 mm. Een belangrijke toepassing van doorslijpen is het verwijderen van het gietsysteem en de opkomers van een gietstuk.



Figuur 7.22 Doorslijpmachine



Figuur 7.23 Routerfreesproducten

Zowel zagen als doorslijpen zijn vrijwel altijd voorbewerkingen. De bereikbare nauwkeurigheid en oppervlaktekwaliteit zijn matig.

7.2.3 Omtrekfrezen

Omtrekfrezen, ook wel aangeduid met de Engelse term **router milling**, is het maken van de omtrek van producten door een vingerfrees langs de omtrek te bewegen. Vaak gaat het om een stapel dunne platen (met een totale dikte van 6 tot 12 mm). Hiermee kan een aantal producten tegelijkertijd worden bewerkt. Men spreekt dan ook wel van **pakketfrezen**. In figuur 7.23 zie je het resultaat van een dergelijke bewerking. Omtrekfrezen wordt vooral toegepast in de vliegtuigbouw. Het gaat hier om lage productaantallen, waardoor de eenmalige kosten en de inrichtkosten voor een compleetstempel veel te hoog zouden zijn. Bovendien leidt de kwaliteit van een geponst oppervlak tot vermoeiingsscheuren, zoals we eerder al vermeldden.

7.3 Fysisch scheidende bewerkingen

Fysisch scheidende bewerkingen onderscheiden zich van zuiver mechanische bewerkingen door het gebruik van alternatieve (niet-mechanische) energievormen, zoals elektrische, thermische of elektromagnetische energie. Bij de meeste technieken (behalve bij waterstraalsnijden) worden er geen of slechts zeer kleine krachten op het werkstuk uitgeoefend. Hierin verschillen deze bewerkingen van mechanische bewerkingen. Het betreft technieken die pas sinds circa 1960 op industriële schaal worden toegepast, hoewel brandsnijden al langer wordt gebruikt. Er wordt daarom ook wel gesproken van moderne bewerkingstechnieken, in tegenstelling tot klassieke (zuiver mechanische) bewerkingstechnieken.

Drie redenen om te kiezen voor fysische bewerkingstechnieken kunnen zijn:
- Fysische bewerkingen zijn niet afhankelijk van de mechanische eigenschappen van een materiaal. Harde metalen laten zich thermisch bijvoorbeeld net zo gemakkelijk bewerken als zachte metalen.
- Bij de meeste processen wordt de energie in een zeer sterk geconcentreerde bundel toegevoerd. Hierdoor ontstaat een zeer smalle snede, waardoor details nauwkeurig kunnen worden gerealiseerd. Bovendien is er geen of slechts een smalle **warmtebeïnvloede zone**, het gebied aan weerskanten van de snede waarvan de materiaaleigenschappen ongewenst zijn beïnvloed door de toegevoerde warmte.
- Soms bestaat er geen mechanisch equivalent voor de bewerkingsmethode.

Deze paragraaf behandelt de thermische scheidingsmethoden brandsnijden, plasmasnijden, lasersnijden en draadvonken. Ook waterstraalsnijden wordt behandeld. Sommige technieken hebben we al besproken in hoofdstuk 6 en zullen daarom hier slechts summier behandeld worden. In dit hoofdstuk bespreken we vooral de mogelijkheden en beperkingen van de technieken. We bekijken ook verschillende machines en geven enkele toepassingsvoorbeelden.

7.3.1 Brandsnijden

Brandsnijden, ook wel **autogeen snijden** genoemd, is een thermische bewerkingsmethode. De benodigde warmte wordt verkregen door het verbranden van een mengsel van een gas, meestal acety-

leen (C_2H_2), en zuurstof. Door de gasvlam wordt bij staal het materiaal voorverwarmd tot dicht onder de ontstekingstemperatuur, waarna oxidatie plaatsvindt in een afzonderlijke stroom zuurstof, aangevoerd door het hart van de snijbrander (zie figuur 7.24). De verbranding levert zoveel warmte dat verwarmen niet meer nodig is wanneer de reactie eenmaal op gang gekomen is. De gasvlam blijft echter nodig om de vloeibare ijzeroxiden weg te blazen en om bij onderbrekingen het proces weer op gang te brengen. De voorverwarmtemperatuur neemt toe met het koolstofgehalte van het materiaal. Het feitelijke snijden vindt voornamelijk plaats door verbranding, terwijl een klein gedeelte van het materiaal smelt.

Autogeen snijden is slechts mogelijk wanneer:
- de verbrandingstemperatuur van het materiaal lager is dan de smelttemperatuur;
- de oxidatie van het materiaal in de zuurstofstraal zoveel warmte ontwikkelt dat het proces zichzelf in stand houdt;
- het smeltpunt van het materiaal hoger ligt dan dat van zijn oxide.

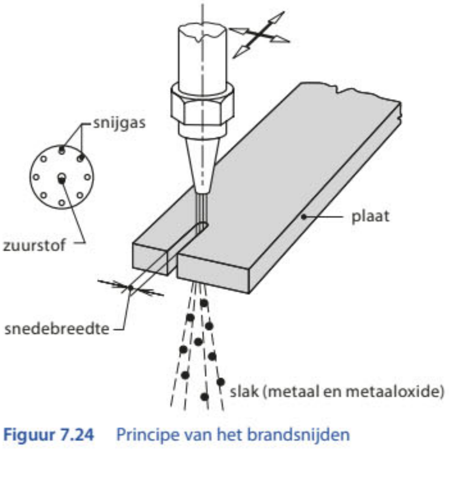
Materialen die aan deze voorwaarden voldoen zijn ongelegeerde koolstof- en gietstalen en verschillende gelegeerde staalsoorten. Staal Fe360 heeft bijvoorbeeld een smeltpunt van ongeveer 1500°C. De verbrandingstemperatuur bedraagt circa 1150°C, het smeltpunt van ijzeroxide ligt bij ongeveer 1350°C. Materialen als gietijzer, lichtmetalen, koper en brons voldoen niet aan de voorwaarden. Gelegeerde staalsoorten als roestvast staal zijn moeilijk autogeen te snijden door de hoge smelttemperatuur van de oxidehuid met een hoog chroomgehalte.

Het gebruikte gas, het werkstukmateriaal en de kwaliteitseisen bepalen hoe dik het materiaal kan zijn dat met brandsnijden kan worden gesneden. Met acetyleen kan een maximale dikte van 500 mm worden gesneden. De breedte van de snijspleet varieert, afhankelijk van de plaatdikte, van 1,5 tot 10 mm. De bereikbare nauwkeurigheid is meestal voldoende als voorbewerking voor het lassen (zie figuur 14.17). Het gesneden oppervlak is echter ruwer dan het oppervlak verkregen met zagen of uitsnijden.

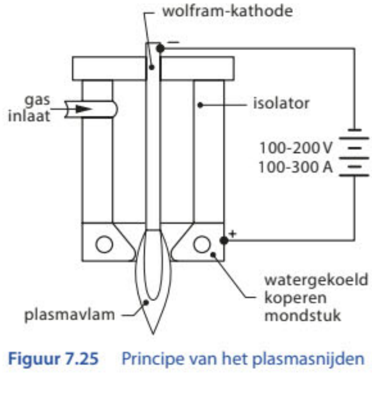
Autogeen snijden wordt onder meer toegepast voor het voorbewerken van lasnaden en het verwijderen van las- en materiaalfouten. Het wordt ook toegepast voor het in vorm snijden van platen voor schepen en staalconstructies. De brander kan langs elke willekeurige (tweedimensionale) contour worden bewogen. Dit kan met de hand gebeuren, maar ook mechanisch met behulp van kopieermallen of computergestuurd, bijvoorbeeld met industriële robots. De productiviteit van het proces kan worden verhoogd door twee of meer lagen plaat in één keer te bewerken of door een aantal branders tegelijkertijd in te zetten. Ook is het mogelijk om onder water te snijden (dit is vooral van belang voor de scheepsbouw). Dit wordt gedaan met een speciaal ontworpen brander, waarbij gecomprimeerde lucht een soort scherm vormt tussen de vlam en het water.

7.3.2 Plasmasnijden

Ook **plasmasnijden** is een thermisch snijproces. Hierbij wordt een elektrische boog gevormd tussen een wolframkathode en een watergekoeld koperen mondstuk (zie figuur 7.25). Door deze boog wordt een gas geblazen dat door de hitte van de boog ont-



Figuur 7.24 Principe van het brandsnijden



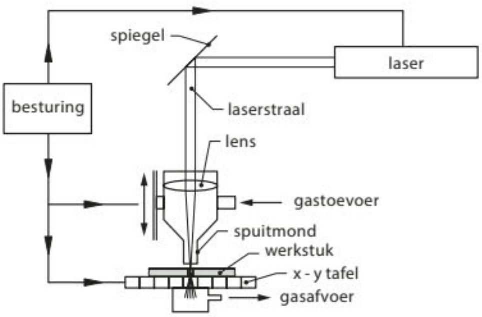
Figuur 7.25 Principe van het plasmasnijden

leedt in elektronen, ionen en neutrale deeltjes. In dit plasma worden zeer hoge temperaturen bereikt van circa 30.000°C. Als de stroming in de brander laminair is, verloopt het proces zeer stil. Is de stroming echter turbulent, dan is het geluidsniveau zeer hoog.

Bij dit proces kunnen zeer hoge snijsnelheden worden bereikt. De productiviteit van plasmasnijden ligt daardoor hoger dan die van brandsnijden. Andere voordelen van plasmasnijden ten opzichte van brandsnijden zijn het gladde oppervlak en de nauwe snijspleet. Plasmasnijden wordt vooral gebruikt voor het snijden van plaatmateriaal uit roestvast staal en non-ferrometalen.

7.3.3 Lasersnijden

Bij **lasersnijden** (zie figuur 7.26) wordt een zeer klein vlakje met een diameter kleiner dan 1 mm (de brandvlek) van het te snijden materiaal op zeer hoge temperatuur gebracht (bijvoorbeeld 10.000°C). Het metaal wordt zodoende plaatselijk op ontstekingstemperatuur gebracht en eventueel door een zuurstofstraal verbrand en weggeblazen. De hierbij optredende exotherme reactie levert aanvullende energie, waardoor er een hoge snijsnelheid gerealiseerd kan worden. Bij toepassing van een inert gas zal het laservermogen veel groter moeten zijn en dient het gas juist om de zuurstof buiten te sluiten en om het gesmolten materiaal weg te blazen.
Om het proces goed te laten verlopen moet aan de volgende voorwaarden worden voldaan:
- De straling moet het materiaal kunnen binnendringen.
- De energietoevoer naar de te verhitten zone moet groter zijn dan de warmteafvoer als gevolg van geleiding door het werkstukmateriaal.
- Aangezien het werkstukmateriaal alleen door absorptie kan worden verhit, mag het materiaaloppervlak de lichtstraling niet te sterk reflecteren.



Figuur 7.26 Schematische afbeelding van het lasersnijden

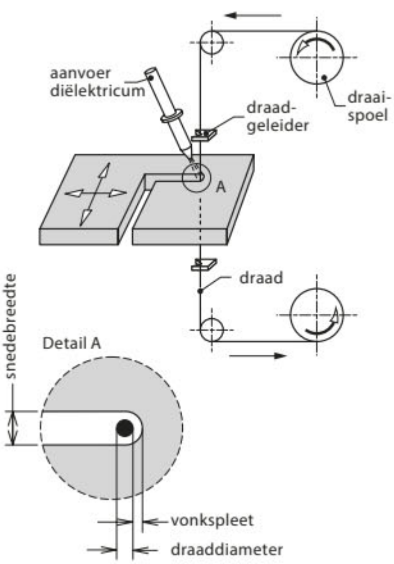
De reflectiecoëfficiënt en de warmtegeleidingscoëfficiënt mogen dus niet te hoog zijn. Ook moeten de specifieke warmte, de smeltwarmte en de verdampingswarmte zo laag mogelijk zijn. Een werkstuk dat door lasersnijden wordt geproduceerd, heeft een smalle warmtebeïnvloede zone.

Lasersnijden wordt meestal toegepast voor plaatdikten kleiner dan 5 mm. De meeste metalen, waaronder gelegeerde en ongelegeerde staalsoorten, zijn zeer goed met een CO_2-laser te snijden. Een uitzondering hierop vormen metalen die niet aan genoemde voorwaarden voldoen. Dit zijn onder andere aluminium, messing, zilver, koper, goud en hun legeringen. Bijna alle niet-metallische materialen zijn goed te snijden met een laser, maar niet met de overige thermisch scheidende bewerkingen. Lasersnijden (en laserboren) van deze materialen wordt veel gebruikt in de elektronische industrie. Het proces is uitermate geschikt voor het boren van kleine gaatjes, bijvoorbeeld met een diameter van 0,005 mm en een diepte/diameterverhouding van 50.

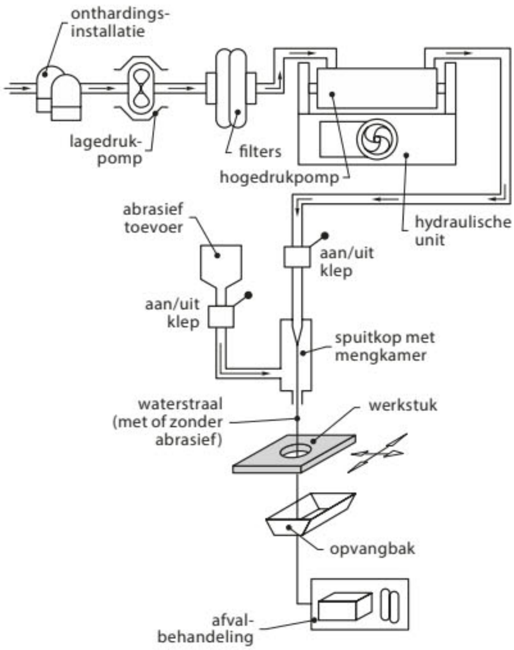
Voordelen van lasersnijden ten opzichte van brandsnijden en plasmasnijden zijn de zeer smalle snijspleet, de daarmee samenhangende goede weergave van details en het ontbreken van braamvorming, terwijl er geen bewerkingskrachten op het werkstuk worden uitgeoefend. Bovendien is het een 'schone' methode; er wordt meestal geen verbrandingsgas bij gebruikt. Ondanks de hoge aanschafprijs van lasers met hoog vermogen worden deze steeds meer toegepast. Om rendabel te kunnen werken moeten dan wel vele meters materiaal worden gesneden.

7.3.4 Draadvonken

Het vonkverspanen berust op het wegnemen van materiaal door vonkoverslag tussen een elektrode en het werkstuk via een isolerende vloeistof. De theorie van het vonkverspanen hebben we besproken in hoofdstuk 6. **Draadvonken** is een vorm van vonkverspanen, waarbij de elektrode bestaat uit een strak gespannen draad. Door het continu doorvoeren van de draad tussen een afwikkel- en een opwikkelspoel blijft de draaddiameter constant, en de snededikte ook (zie figuur 7.27). Het proces lijkt wel wat op figuurzagen. Door het schuinstellen van



Figuur 7.27 Schematische afbeelding van het draadvonken



Figuur 7.28 Schematische afbeelding van het waterstraalsnijden

de draad kunnen schuine en kegelvormige vlakken worden vervaardigd.

Omdat het proces langzaam verloopt (met een afnamesnelheid van 0,03-0,7 mm^3/s), komt het in het algemeen slechts in aanmerking voor enkele stuks of kleine series (al worden de gleuven in de scheerkoppen van het Philips-scheerapparaat merkwaardig genoeg ook met behulp van draadvonken gemaakt.)
Het proces wordt daarom vooral toegepast bij de fabricage van snijstempels, extrusiematrijzen en andere werkstukken uit moeilijk bewerkbare (harde) materialen. Grote voordelen van draadvonken zijn de flexibiliteit en de eenvoudige wijze van programmering. Daardoor wordt deze techniek steeds meer toegepast bij het maken van prototypen van plaatvormige producten. Deze kunnen soms in pakketten van 10 tot 100 stuks gelijktijdig worden uitgesneden.

7.3.5 Waterstraalsnijden

Bij **waterstraalsnijden** wordt een uiterst dunne en krachtige waterstraal gebruikt om een nauwe snijspleet te maken (zie figuur 7.28). De pomp levert drukken in de orde van 400 MPa. De spuitopening heeft een diameter tussen 0,1 en 0,3 mm. Met deze techniek (zie ook paragraaf 6.4.3) kan een verscheidenheid aan materialen worden bewerkt, zoals plastics, textiel, rubber, hout, papier, leer, isolatiematerialen, baksteen en vezelversterkte kunststoffen. In het geval van papier kunnen diktes tot 40 mm worden bewerkt, in het geval van isolatiematerialen zelfs diktes tot 250 mm. Door het water te mengen met fijne korrels (grit) is het ook mogelijk metalen, harde materialen zoals keramiek en inhomogene materialen zoals metaallaminaten en gewapend beton te bewerken.

De voordelen van waterstraalsnijden zijn:
- Het proces kan op elke plaats in het materiaal gestart worden, zonder dat een voorgeboord gat nodig is.
- Er wordt geen warmte geproduceerd.
- Er vindt geen doorbuiging van de rest van het werkstuk plaats, dus het is goed mogelijk om flexibele materialen te bewerken.
- Er is weinig braamvorming.
- Ook niet-elektrisch geleidende materialen zijn te bewerken.

7.4 Keuze van een scheidende bewerking

In figuur 7.29 vind je een aantal belangrijke eigenschappen van de verschillende scheidende bewerkingen terug. Deze figuur is bedoeld om de keuze voor een bepaalde scheidende bewerking te vereenvoudigen.

In deze paragraaf trachten we geen volledige systematiek in het keuzeproces aan te geven. We behandelen slechts een aantal aspecten, waarbij we alleen uitgaan van het scheiden van metalen.

Het keuzeproces start met het werkstukmateriaal. Hierbij zijn eigenschappen als soort, hardheid, dikte en scheurgevoeligheid bij wisselbelasting

Scheidings-processen	Toepassing	Productie-snelheid	Voor- en nadelen	Maatnauw-keurigheid (mm)	Grootte WBZ (mm)
Knippen	metalen plaat 0,2 tot 10 mm	lengte per knipslag	+ grote lengten – braamvorming	>0,1	–
Ponsen	metalen plaat 0,2 tot 10 mm	tot 30 slagen per sec	+ massa – braamvorming	>0,1	–
Knabbelen	metalen plaat 0,2 tot 10 mm	tot 0,1 m/s	+ massa + kleine producten + contouren – braamvorming – ruw	0,1	–
Uitsnijden	metalen plaat 0,2 tot 3 mm	tot 30 slagen per sec	+ massa + kleine producten	0,05	–
Zagen	metalen plaat, buis, staf >1mm	tot 0,05 m/s	+ enkele stuks, massa – bramen	>0,3	–
Doorslijpen	harde materialen buis, tot 50 mm staf, tot 90 mm	?	+ enkele stuks, massa – bramen	0,05	<0,1
Omtrekfrezen	meerdere metalen platen tot totale dikte van 12 mm	?	+ glad contour – enkele stuks	0,05	–
Waterstraal-snijden	metalen plaat, buis, staf >1 mm	tot 0,08 m/s	+ flexibel + enkele stuks en kleine series + geen WBZ – lawaai	0,1	–
Brandsnijden	laaggelegeerd staal, plaat (>500 mm), buis, profiel 2 mm tot heel dik	tot 0,05 m/s	+ flexibel + enkele stuks en kleine series – lawaai – WBZ	>0,5	>2
Plasmasnijden	elektr. geleidende materialen plaat (>10 mm), buis, profiel tot 25 mm	tot 0,2 m/s	+ flexibel + enkele stuks en kleine series – WBZ	0,5	>1
Lasersnijden	plaat, buis, profiel tot 5 mm	tot 0,2 m/s	+ flexibel + enkele stuks en kleine series + snedekwaliteit + kleine WBZ	0,2	>0,1
Draadvonken	harde geleidende materialen	tot 0,7 mm ^{3}/s	+ flexibel + enkele stuks en kleine series + snedekwaliteit – traag	0,05	<0,1

WBZ: warmtebeïnvloede zone
NB: de getalwaarden zijn indicatief

Figuur 7.29 Eigenschappen en toepassingen van verschillende scheidingsprocessen

van belang. Een plaatonderdeel voor een vliegtuig mag bijvoorbeeld meestal niet worden geponst of geknabbeld, maar moet worden verspaand, bijvoorbeeld met een routerfrees.
De materiaaldikte is ook belangrijk. In figuur 7.29 zijn in de eerste kolom de toepasbare materiaaldiktes opgenomen. Autogeen- en plasmasnijden kunnen toegepast worden bij grote materiaaldiktes.

De gevraagde vorm van de snede is ook belangrijk bij het kiezen van het scheidingsproces. Thermische snijprocessen uitgevoerd op moderne machines kunnen willekeurige vormen realiseren. Bovendien kunnen er laskanten worden aangebracht (zie bijvoorbeeld de voorbereiding van de V-las en de X-las in figuur 9.23). Kleine gaten kunnen minder goed worden gemaakt met autogeen en plasmasnijden. Lasersnijden is hiervoor veel beter geschikt. Met mechanische snijprocessen kunnen vaak grote diktes worden verwerkt. Waterstraalsnijden is ook zeer geschikt voor grotere diktes.
Ponsen en knabbelen worden toegepast in de serie- en massafabricage van producten uit een dunne plaat. Het grote voordeel van knabbelen is dat met eenvoudig gereedschap toch willekeurig gekromde contouren kunnen worden gerealiseerd.

Een belangrijk criterium bij de keuze van het scheidingsproces is de nauwkeurigheid van de snede. Twee aspecten spelen daarbij een rol: de maatnauwkeurigheid en de vorm van de snede. Bij autogeen snijden kan het voorkomen dat er door een verkeerde branderinstelling een goede vorm gesneden wordt, maar de snede een systematische verschuiving ondergaat, waardoor de maatnauwkeurigheid niet wordt gehaald.
Thermische processen brengen warmte in het plaatmateriaal. Dit kan spanningen veroorzaken die leiden tot het ‘trekken’ van de plaat, met als gevolg maatonnauwkeurigheid. Het is daarom van belang een bewerkingsvolgorde te kiezen die deze invloed kan compenseren. Bij lasersnijproces is de thermische beïnvloeding veel geringer. Ook mechanische scheidingprocessen veroorzaken spanningen in het werkstuk, maar over het algemeen minder dan thermische processen.
In de praktijk speelt bij de keuze van het scheidingsproces de nauwkeurigheid niet altijd een grote rol. Mogelijk kan de gewenste nauwkeurigheid toch niet worden gehaald en is er hoe dan ook een nabewerking nodig is. In dat geval wordt op grond van materiaaldikte vaak een thermisch snijproces gekozen. Bij een gevraagde hoge contournauwkeurigheid moeten de contouren mechanisch worden nabewerkt en is de nauwkeurigheid van het scheidingsproces nauwelijks van belang. Bij geringere plaatdikten worden mechanische scheidingsprocessen en lasersnijden gebruikt. Hiermee kunnen hoge nauwkeurigheden worden gehaald.

Als je weet welke scheidingsprocessen voorhanden zijn en welke technisch geschikt zijn, baseer je de uiteindelijke keuze waarschijnlijk op de kosten. Vaak zal de keuze hierbij vallen op het proces met de hoogste productiesnelheid (zie figuur 7.29). Bij waterstraalsnijden en de thermische snijprocessen kan de machine worden voorzien van meerdere snijkoppen. Ondanks de hogere investering in de machine kan dit leiden tot een goedkoper scheidingsproces.

Samenvatting

Dit hoofdstuk beschrijft de processen waarmee materiaal wordt gescheiden, dat wil zeggen zodanig verdeeld dat het uitgangsmateriaal geheel behouden blijft (bij de niet-verspanende mechanische processen, waaronder ponsen en knippen) of voor het overgrote deel behouden blijft (bij de verspanende mechanische en de fysische processen).

Bij het ponsen en uitsnijden ligt de informatie over de vorm van het product veelal vast in het gereedschap. Ze lenen zich daarom vooral voor massafabricage. Bij de andere processen genereert de gereedschapsbeweging de vorm van het product. Deze processen zijn dus geschikter voor de fabricage van kleine series of enkele stuks.

De fysische processen (brandsnijden, plasmasnijden, lasersnijden, draadvonken en waterstraalsnijden) hebben als specifiek voordeel dat er geen krachten op het werkstuk worden uitgeoefend (behalve bij waterstraalsnijden). Deze 'moderne' technieken kunnen materialen verwerken die met de traditionele methoden niet te bewerken zijn en ze kunnen vormen realiseren die op geen andere wijze zijn te bereiken.

Bij de mechanische, verspanend scheidende bewerkingen (zagen, doorslijpen en (omtrek)frezen) is het verspaand volume meestal zeer klein. Het grote voordeel is dat de zone waarin het werkstukmateriaal van structuur verandert, zeer gering is. Zagen en doorslijpen zijn echter meestal alleen geschikt als voorbewerking, omtrekfrezen is geschikt als nabewerking.

De eigenschappen van het werkstukmateriaal, de gevraagde vorm en de nauwkeurigheid van de snede, en de kosten van het proces zijn van belang bij de keuze voor een bepaalde scheidende bewerking.

Literatuur

7.1 Kalpakjian S., Schmid S.R., *Manufacturing Engineering and Technology*, 7th edition, Pearson, 2014, ISBN 978-0133128741. Paragraaf 16.2: 'Shearing'.

7.2 Ramaekers J.A.H., Peeters P.B.G., *Omvormen van metalen*, Academic Service, 1998, ISBN 978-90-395-0579-3.

7.3 Scheidingstechnieken voor metalen, *Voorlichtingsbladen voor de metaalindustrie*: VM 114, uitgave FME-CWM.

7.4 Spaanloos snijden; stempels en matrijzen, *Voorlichtingsbladen voor de metaalindustrie*: VM 73, uitgave FME-CWM.

7.5 Groover M.P., *Principles of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems*, 5th edition, John Wiley & Sons Inc., 2013, ISBN 978-1-118-47140-1. Hoofdstuk 16 'Sheet metalworking'.

Oefenvragen

7.1 Noem enige factoren die van invloed zijn op de kwaliteit van het gesneden vlak bij de ponsbewerking en geef de belangrijkste kwaliteitskenmerken.

7.2 Bij welk soort producten is knippen of knabbelen niet als eindbewerking toegestaan?

7.3 Welke scheidende bewerkingen komen in aanmerking voor zeer harde materialen?

7.4 Bij de volgende producten moet een scheidende bewerking worden gekozen, welke kies je en waarom?
a Scheepsplaatdelen van staal
b Scheepsplaatdelen van aluminium
c Een enkele stalen kast
d Plaatdelen voor een vliegtuig.

7.5 Uit 10 mm dikke metalen platen moet een grote serie werkstukken gesneden worden. Het smeltpunt van het materiaal ligt bij 1300 °C en de verbrandingstemperatuur ligt bij 1450 °C.
Welke fysische bewerkingsmethode(n) kan (kunnen) hier het best voor gebruikt worden en waarom?

inclusief website!

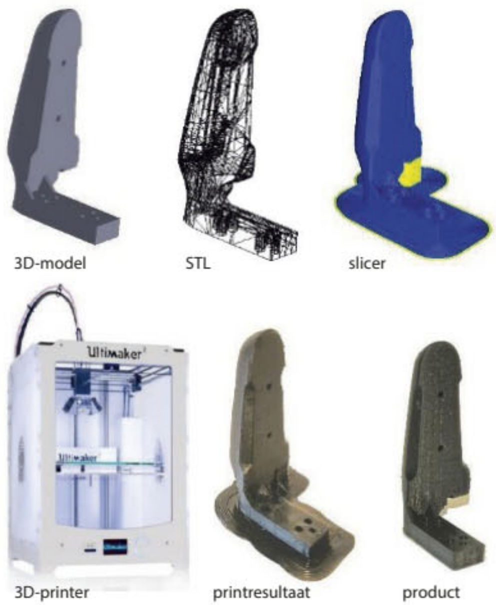
Op www.industrieleproductie.nl vind je de antwoorden op deze vragen, maar ook extra studie- en oefenmateriaal, zoals video's en meer opgaven.

8 Materiaalaangroeitechnieken

In dit hoofdstuk lichten we de algemene opbouw van 3D-printprocessen nader toe. Onze focus ligt hierbij op industriële printers en toepassingen. We bespreken de zeven hoofdgroepen van materiaalaangroeitechnieken en gaan in op de voor- en nadelen van deze processen. Let wel, het overzicht van deze technieken dat we hier geven is niet compleet; er komen jaarlijks vele nieuwe procesvarianten op de markt.

8.1 De algemene opbouw van materiaalaangroeitechnieken

Materiaalaangroeitechnieken (ook wel **3D-printen** of additive manufacturing genoemd) is een recent ontstane groep processen die sterk in opkomst zijn. Met name het rechtstreeks vanuit een CAD-bestand nauwkeurig kunnen produceren van zeer complexe vormen is een revolutionaire ontwikkeling. Het eerste patent voor een zogeheten vloeistofbadfotopolymerisatietechniek dateert van 1984 (Chuck Hull, SLA of stereolithography), terwijl de ontwikkeling van twee zelfbouw-3D-printers (Fab@Home en de RepRap) in 2005 ertoe leidde dat de techniek bij een breder publiek onder de aandacht kwam. De ontwerpen van deze machines werden openlijk gedeeld,



Figuur 8.1 De serie stappen om een product te maken met een 3D-printer

waardoor vele nieuwe machine- en procesvarianten ontstonden. Daarnaast ontstonden *open source communities* (FabLab, Makerspace), waardoor de basis van de techniek bij een breed publiek bekend werd. Men verwacht dat als de huidige trend in de ontwikkelingen van 3D-printen doorzet, in 2040 maar liefst 50% van onze producten met 3D-printen gefabriceerd zal worden.

De eerste 3D-printers waren vloeistofgebaseerd. De laagjes ontstonden door uitharding met licht. Dit proces had zijn beperkingen; het was slechts geschikt voor één type materiaal en maakte gebruik van specifieke ontwerpregels voor het eindproduct. Vanaf eind jaren '80 werden er mede daarom andere procesvarianten ontwikkeld (zie paragraaf 1.2). Mede door de open source communities zijn er ondertussen honderden varianten van 3D-printprocessen ontstaan, allemaal met hun eigen toepassingsgebied, materialen, voor- en nadelen. De 3D-printers die zijn ontstaan worden zowel thuis, op kantoor als professioneel toegepast. Om een 3D-geprint product te verkrijgen dienen een aantal stappen doorlopen te worden (zie figuur 8.1). Deze stappen zijn voor alle procesgroepen en -varianten min of meer gelijk. We zullen deze stappen in dit hoofdstuk nader toelichten.

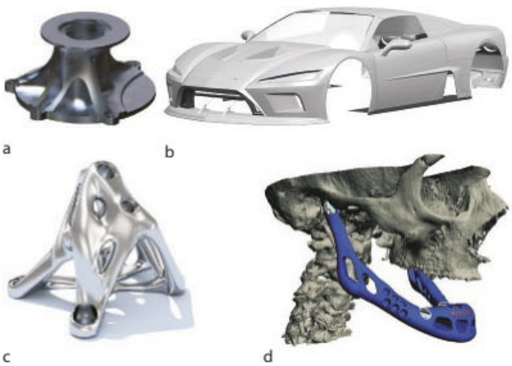
8.1.1 Het 3D-ontwerp

Het ontstaan van 3D-printen is sterk verbonden met de ontwikkeling van computers en 3D-modelleersoftware. Het 3D-model staat aan de basis van de materiaalaangroeitechnieken en wordt voor deze technieken op verschillende manieren gemodelleerd (zie figuur 8.2).

De beoogde geometrie wordt gewoonlijk gemodelleerd met behulp van daarvoor geschikte 3D-modelleerprogramma's. Er worden twee vari-

anten gebruikt van deze programma's. Bij de eerste soort programma's wordt de gehele 3D-geometrie beschreven door eenvoudige bewerkingen uit te voeren op volume-elementen zoals kubussen en cilinders (**solid modelling**). De resulterende 3D-geometrie is realistisch en bevat geen gaten of locaties waar geometrie-elementen dubbel zijn gedefinieerd. Voor complexe structuren is deze werkwijze echter wel arbeidsintensief. De tweede variant betreft programma's die alleen de oppervlakten van de geometrie beschrijven. Deze programma's zijn primair geschikt voor dubbel gekromde oppervlakken (**surface modelling**). Op deze manier kunnen snel complexe en realistische modellen worden gemaakt, die vooral voor representatieve doeleinden worden gebruikt. Een nadeel van deze programma's is dat de resulterende modellen niet altijd 3D-printbaar zijn, omdat niet alle geometrie gedefinieerd is (de door de ontwerper gedefinieerde vlakken sluiten niet goed aan) of soms juist dubbel gedefinieerd is. Indien de ontwerper (of specialistische software) in staat is deze fouten te voorkomen of te herstellen, dan zijn oppervlaktegebaseerde programma's beter in staat om de complexe modellen te genereren die karakteristiek zijn voor 3D-printen.

Naast computerprogramma's die kunnen worden gebruikt voor het handmatig modelleren van de geometrie, spelen computerprogramma's die geometrie genereren ook een grote rol. **Topologie-optimalisatieprogramma's** zijn bijvoorbeeld in staat om op basis van randvoorwaarden de lichtste geometrie te berekenen waarbij het materiaal niet bezwijkt en er niet te veel vervorming plaatsvindt. Omdat de berekende geometrie grillig van vorm is,



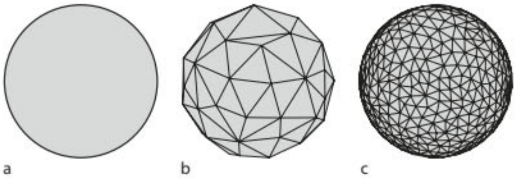
Figuur 8.2 Volumemodel (a), oppervlaktemodel (b) topologie-optimalisatiemodel (c) en scangebaseerd model (d)

is deze alleen geschikt om met 3D-printprocessen te vervaardigen. Daarnaast zijn er programma's die geometrie creëren op basis van algoritmes of wiskundige formules en op die manier in staat zijn zeer complexe vormen te creëren.
Wanneer er reserveonderdelen moeten worden gemaakt, of producten waarvan de geometrie afhangt van de menselijke anatomie, kunnen ook 3D-scantechnieken worden gebruikt om de vorm te definiëren. De scan zelf resulteert in een discrete set van datapunten, bijvoorbeeld een wolk van punten op het oppervlak van het product of een serie foto's van dwarsdoorsnedes. Voordat men verder kan met de volgende stap in het printproces, moet deze discrete data omgezet worden in een continue beschrijving van het oppervlak van het product. Deze omzetting is vaak complex en tijdrovend, met als gevolg dat **3D-scannen** vaak alleen efficiënt toegepast kan worden voor zeer complexe geometrieën. Ten slotte is er een steeds groeiend aantal 3D-modellen verkrijgbaar via databases op internet. Allerlei onderdelen kunnen gratis of tegen betaling worden verkregen. Het hangt af van de doelstelling van de ontwerpers in hoeverre de resulterende 3D-producten geschikt zijn voor functionele toepassingen.

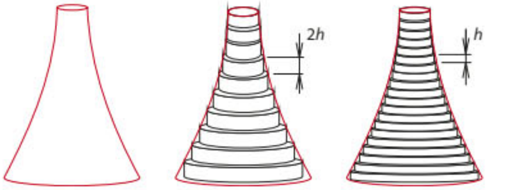
8.1.2 Het digitale model voor de printer

De 3D-modellen en scandata worden aangemaakt met speciale programma's en apparatuur, waarbij de resulterende gegevens worden opgeslagen in een voor dat programma specifiek bestandsformaat. Om alle mogelijke structuren waar 3D-modellen in worden opgeslagen te kunnen koppelen aan alle mogelijke 3D-printers, heeft men een aantal bestandsformaten gekozen die door 3D-printers kunnen worden verwerkt. Twee van de belangrijkste bestandsformaten zijn STL (*Standard Tessellation Language*) en AMF (*Additive Manufacturing File Format*).

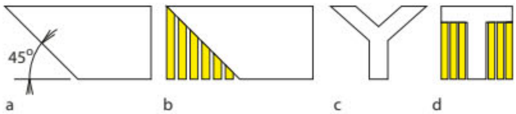
STL is een 'file format' waarin het oppervlak van de gemodelleerde geometrie wordt benaderd door driehoeken. Hoe meer driehoeken er worden toegepast, hoe beter de benadering van de originele geometrie, maar ook hoe groter het bestand en hoe arbeidsintensiever de daarmee samenhangende dataverwerking (zie figuur 8.3). Van de driehoeken worden de hoekpunten vastgelegd. De naar buiten wijzende normaal van het oppervlak wordt opgespannen door de drie hoekpunten. Deze normaal wordt gebruikt



Figuur 8.3 De STL-benadering van een bol (a) met verschillende aantallen oppervlaktedriehoeken (b en c) (Solidworks)



Figuur 8.4 Het effect van laagdikte op de gewenste geometrie en de oppervlakteruwheid (Materials Today)



Figuur 8.5 Het gebruik van steunstructuren (geel) (3DHubs)

om te kunnen aangeven aan welke zijde van de driehoek zich het materiaal bevindt.

AMF is een bestandsformaat waarbij niet het oppervlak maar het volume van de gemodelleerde geometrie wordt benaderd door volumedriehoeken. Hierdoor is het mogelijk om ook het inwendige van het product van gedetailleerde informatie te voorzien. Hier kan bijvoorbeeld het materiaal, de kleurgradiënten en de porositeit in het inwendige van het product worden gedefinieerd.

8.1.3 Werkvoorbereiding voor het printproces

Printers hebben hun eigen printsoftware. Deze software zet de beschrijving van de geometrie (vastgelegd in bijvoorbeeld een STL- of AMF-bestandsformaat) om in machinecode, waardoor het daadwerkelijke printproces door de 3D-printer uitgevoerd kan worden. Voorafgaand aan het daadwerkelijk genereren van deze code dient de gebruiker een aantal zaken te definiëren. We noemen hier de laagdikte, de ondersteunende structuren, de onderdeeloriëntatie, de inwendige productstructuur en de printtemperatuur en -snelheid.

Instellen laagdikte

De gemodelleerde 3D-geometrie wordt geprint in meerdere lagen. De gebruiker kan hierbij vaak kiezen uit een beperkt aantal laagdiktes. Door lagen toe te voegen verbetert de benadering van de geometrie en wordt de resulterende oppervlakteruwheid van het geprinte product lager (zie figuur 8.4). Extra lagen verhogen echter ook de totale printtijd. De hoogte van de laagjes zorgt voor trapjes in de schuine oppervlakken van het model. Deze bepalen de lokale oppervlakteruwheid.

Ontwerpen van ondersteunende structuren

Iedere nieuwe laag die geprint wordt, dient te rusten op de onderliggende lagen materiaal. In de praktijk betekent dit dat voor een aantal procesvarianten extra materiaal moet worden geprint om horizontale en schuine vlakken te ondersteunen (vanaf 0° (horizontale vlakken) tot aan 45-60° overhang, waarbij de bovengrens afhankelijk is van het type proces en de procesinstellingen; zie ook figuur 8.5). Het printen van deze **steunstructuren** kost printtijd en materiaal. Dit materiaal moet bovendien tijdens de nabewerkingsfase weer verwijderd worden. Het automatisch verwijderen van het steunmateriaal kan veel tijd kosten terwijl het handmatig verwijderen soms arbeidsintensief en daarmee duur is. Na het verwijderen van de steunstructuren blijven bij sommige procesvarianten littekens achter op het oppervlak van het product. Men probeert dus de minimale hoeveelheid steunstructuren te gebruiken die het mogelijk maakt een product van hoge kwaliteit te printen.

Onderdeeloriëntatie

De geometrie kan in vele oriëntaties geprint worden. Het optimaliseren van de oriëntatie van het product heeft allerlei voordelen. Zo kan het bouwvolume dan beter benut worden en kan de oppervlaktekwaliteit van belangrijke vlakken van het product worden verbeterd. Ook kan de benodigde hoeveelheid steunstructuren worden verminderd en kan men rekening houden met de verschillen in de mechanische eigenschappen die in het geprinte product ontstaan

Inwendige productstructuur

3D-printers hebben aparte instellingen voor het produceren van de oppervlakken van de geome-

trieën en voor het produceren van de inwendige delen van een product. Het oppervlak wordt dan massief geprint terwijl het inwendig hol of met een structuur (bijvoorbeeld honingraat) wordt geprint. Dit maakt het product minder sterk en stijf, maar lichter en sneller te produceren terwijl men bovendien minder materiaal en energie nodig heeft. Deze aangepaste instellingen voor het inwendige worden met name toegepast voor zichtmodellen en producten met relatief lage mechanische belastingen.

Procesinstellingen

Afhankelijk van het type proces en de beoogde doelgroep kunnen ook zaken als printsnelheid, printtemperatuur, lichtintensiteit of bijvoorbeeld belichtingssduur worden ingesteld. Dit wordt gedaan om de printmachine aan te kunnen passen aan een specifiek printmateriaal of om de kwalteit van het printproces te kunnen beinvloeden. Materiaalextrusieprinters voor thuisgebruik kunnen een grote variatie aan materialen verwerken. Hiervoor moet het printgedrag kunnen worden aangepast aan het gekozen materiaal. Sommige professionele materiaalextrusieprinters werken alleen met materiaal van de printerproducent. Voor deze printers zijn printtemperatuur en printsnelheid niet vrij in te stellen; deze worden vastgelegd door de machinebouwer. Door een hogere extrusietemperatuur (FDM; 8.2.1) of een langere belichtingstijd (Vat polymerisatie; 8.2.7) kan bijvoorbeeld de mechanische sterkte van een product beinvloed worden.

8.1.4 Het printproces

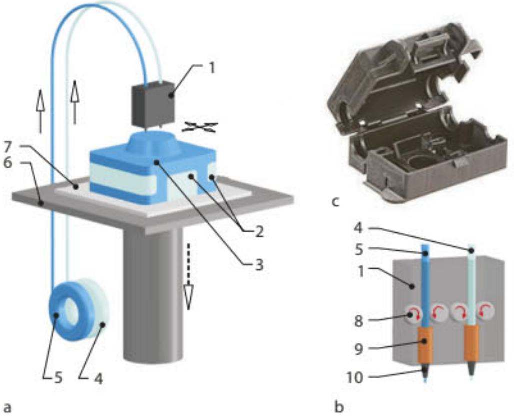
Met behulp van de geometrische informatie (bijvoorbeeld STL of AMF) en de instellingen gekozen tijdens de werkvoorbereiding moet een set instructies (**g-code**; een variant van NC-programmering; zie hoofdstuk 13) voor de 3D-printer worden gegenereerd. Dit wordt gedaan door de **slicer-software**. Deze software deelt het 3D-model op in laagjes en geeft per laagje exact aan waar en met welke machine-instellingen materiaal moet aangroeien. De exacte definitie van deze instructies hangt af van het type proces (zie paragraaf 8.2) en het merk en de uitvoering van de 3D-printer. Nadat de instructies naar de printer zijn verzonden, kan de printer zonder verdere supervisie zijn taken uitvoeren.

8.1.5 Nabewerken

Nadat het printproces is afgelopen, kan het product uit de printer worden verwijderd en worden nabewerkt. Voor sommige processen kan het product pas na enige tijd (soms uren) worden uitgenomen, omdat het product eerst moet afkoelen of gebruikte materialen verder moeten uitharden. De nabewerkingsfase is dus afhankelijk van het type proces. Het product wordt verwijderd van de bouwplaat waarop het gemaakt is en de steunstructuren, losse poeders en overtollige vloeistof worden verwijderd. In sommige gevallen kunnen vervolgens de oppervlakte-eigenschappen (ruwheid, hardheid) en/of de mechanische eigenschappen verbeterd worden. Ten slotte kan het nodig zijn om secondaire bewerkingen uit te voeren (verspanen, polijsten) om aan gestelde functionele eisen te voldoen. Nabewerken kan complex, kostbaar, arbeidsintensief en tijdrovend zijn. Wanneer men kiest voor materiaalaangroeitechnieken mag dit onderdeel daarom zeker niet vergeten worden in de evaluatie.

8.2 Procesvarianten

In de loop van het ontstaan en gebruik van materiaalaangroeitechnieken zijn er veel verschillende 3D-printvarianten ontstaan, maar ook weer verdwenen. In 2012 heeft men een onderverdeling van de processen gemaakt in zeven subgroepen [8.2]. Deze indeling is gebaseerd op overeenkomsten in de processen en vereenvoudigt de regelgeving, de communicatie en het onderwijs met betrekking tot materiaalaangroeitechnieken. Niet alle technieken zijn echter eenduidig aan een van de zeven groepen toe te wijzen. Daarnaast zijn er procesvarianten die 3D-printtechnieken combineren met klassieke verspanende bewerkingsmethoden. Deze hybride processen bespreken we kort in paragraaf 8.2.8. In de rest van deze paragraaf bespreken we de zeven subgroepen, te weten:
- materiaalextrusie;
- materiaaljetten;
- gefocuste-energiedepositie;
- vlakke-plaatprocessen;
- lijmjetten;
- poederbedfusieprocessen;
- vatpolymerisatieprocessen.



1 extrusiekop
2 steunmateriaal
3 product
4 steunmateriaal
5 productmateriaal
6 bouwplaat
7 tussenlaag
8 motoren voor materiaaltransport
9 smelters
10 spuitmonden

Figuur 8.6 Overzicht van het FDM-proces (a) met detail van de printkop (b, Custompartnet) en (c) nylon voorbeeldproduct (Stratasys)

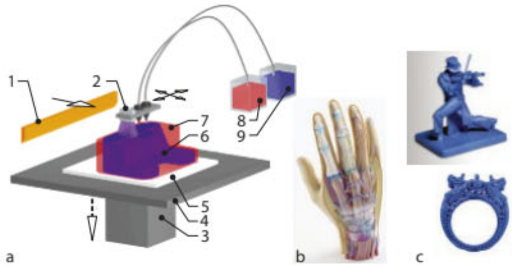
8.2.1 Materiaalextrusie

Materiaalextrusieprocessen worden gekenmerkt door technieken die selectief materiaal deponeren door een spuitmond of extrusieopening. Om 3D-structuren te kunnen vormen met het gedeponeerde materiaal, moeten deze tijdens depositie vloeibaar zijn en kort na depositie voldoende stevigheid bezitten om hun positie en vorm te behouden en om de volgende lagen te kunnen dragen. Vaak betekent dit dat het materiaal een stroperige consistentie moet hebben bij het verlaten van de spuitmond.

FDM (**fused deposition modelling**, zie figuur 8.6) is de bekendste procesvariant binnen de groep van materiaalextrusieprocessen. Hierbij wordt een thermoplastisch kunststof filament gebruikt dat door een verwarmde spuitmond wordt gevoerd. In de spuitmond verweekt het materiaal, zodat het gevormd en gedeponeerd kan worden. FDM-machines kunnen gebruikmaken van meerdere soorten filament in één product. Hierdoor kunnen meerdere kleuren en materiaaltypen worden gecombineerd of kan één materiaaltype worden gereserveerd voor makkelijk te verwijderen steunstructuren (bijvoorbeeld wateroplosbare steunstructuren). Er zijn een aantal aanbieders van professionele FDM-machines, maar door de eenvoud van deze techniek is deze ook zeer geschikt voor thuisgebruik/niet-professioneel gebruik. Niet veel mensen weten dat naast thermoplastische kunststoffen (ABS, nylon, PC, PLA, PVA, Ultem enzovoort) ook allerlei andere materialen met deze extrusietechnologie gevormd kunnen worden. Bijvoorbeeld beton, metalen met een laag smeltpunt, metaalpoeders (onder andere titanium en staal), deeg en chocolade.

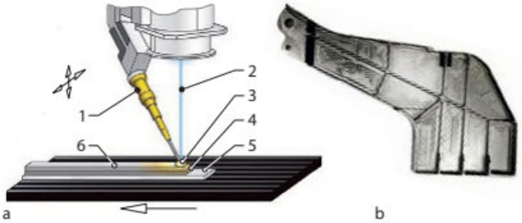
8.2.2 Materiaaljetten

Materiaaljettechnieken (**material jetting**) worden gekenmerkt door het selectief deponeren van productmateriaal. Meestal gebeurt dit in druppelvorm, maar ook poeder en vloeistof-poedercombinaties zijn mogelijk. Deze procesvarianten maken gebruik van de techniek die ook gebruikt wordt in inktjetprinters om de druppels te vormen. Net als bij materiaalextrusie is het mogelijk verschillende soorten materiaal te verwerken in één product. De zeer kleine druppels bepalen de resolutie van het te printen product. Deze techniek wordt vooral gebruikt voor producten waar kleine details en een goede oppervlaktekwaliteit van belang zijn.
Er zijn twee commercieel interessante productieprocesvarianten binnen deze procesgroep: wasprinters en printers die gebruikmaken van fotopolymerisatiekunststoffen. De wasprinters smelten was, die na het jetten afkoelt en gelijk stolt. De geprinte wasmodellen worden bijvoorbeeld gebruikt om met behulp van de verloren-wasmethode zeer gedetailleerde en complexe metalen eindproducten te maken (zie figuur 8.7c). De tweede variant (zie figuur 8.7 a en b) maakt gebruik van fotopolymerisatiekunststoffen. Deze kunststoffen zijn vloeibaar voordat ze verwerkt worden en bestaan uit monomeren en



1 veeglat
2 uv-lamp
3 Z-lift
4 bouwplatform
5 tussenlaag
6 product
7 steunmateriaal
8 steunmateriaalcontainer
9 productmateriaalcontainer

Figuur 8.7 Algemene opbouw van een materiaaljetproces voor fotopolymerisatie van kunststoffen (a) (Custompartnet). Voorbeelden van producten van Objet (b) en Solidscape (c)



1 draadaanvoer
2 laser- of elektronenstraal
3 smeltbad
4 al opgebrachte lagen
5 tussenlaag
6 product

Figuur 8.8 Lasergebaseerd gefocuste-energiedepositieproces (a) (Sciaky) en titanium onderdeel (1,2 meter) van een vliegtuigvleugel (b) (Huntingdon Fusion)

foto-initiators. Door het materiaal met licht van de juiste golflengte (meestal in het uv-spectrum) te beschijnen, ontstaat er een kettingreactie die ervoor zorgt dat de monomeren onderling verbindingen aangaan en het materiaal lokaal uithardt. Bij het jetten van fotopolymerisatiekunststoffen kunnen eenvoudig veel verschillende kleuren en hardheden in één product verwerkt worden (zie figuur 8.7b). Een nadeel van materiaaljettechnieken is dat er slechts een beperkt scala aan materialen voor beschikbaar is. Thermoplastische materialen zoals gebruikt voor materiaalextrusie zijn bijvoorbeeld niet beschikbaar. Metaaljettechnieken worden wel onderzocht, maar zijn commercieel nog slechts zeer beperkt beschikbaar [8.3].

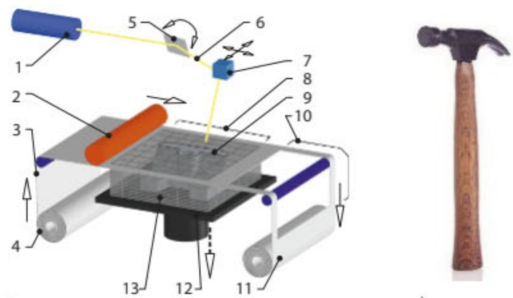
8.2.3 Gefocuste-energiedepositie

Binnen de materiaalaangroeitechnieken zijn er twee subgroepen die gebruikmaken van gefocuste energiebronnen zoals lasers en elektronenbundels. De subgroep gefocuste-energiedepositie omvat processen waarbij materialen (voornamelijk metalen) worden gesmolten op het moment van depositie. Dit wordt gedaan door metaaldraad of metaalpoeder in de focus van de energiebron te brengen (**LENS, laser engineered net shaping**, zie figuur 8.8). Ook worden standaardlastechnieken gebruikt (**WAAM, wire + arc additive manufacturing**).
Vergeleken met poederbedsmelttechnieken (de meest gebruikte materiaalaangroeitechniek voor metalen, zie paragraaf 8.2.6) heeft deze subgroep een aantal kenmerkende voor- en nadelen. Door de aard van het proces is het mogelijk om met gefocuste-energiedepositie producten te printen met meerdere metaalsoorten. De snelheid van de productopbouw (kg/uur) kan bij gefocuste-energiedepositie een factor tien groter zijn dan bij de poederbedgebaseerde processen voor metalen. Een groot nadeel is de zeer hoge oppervlakteruwheid na het printproces. Deze processen worden vooral gebruikt voor grote metalen producten zonder kleine details. Als ondergrens hanteert men 0,2 mm voor kleine details bij poeder gebaseerde processen en 1 mm bij draadgebaseerde processen).

8.2.4 Vlakke-plaatprocessen

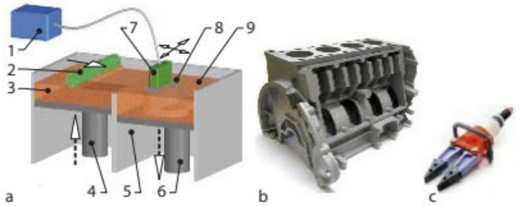
De groep vlakke-plaatprocessen (**LOM, laminated object manufacturing**) omvat alle processen waarbij plaatmateriaal (kunststof, metaal, keramiek, hout, papier) als basismateriaal wordt gebruikt. Het plaatmateriaal, dat in standaardafmetingen aangeleverd wordt, moet in de juiste vorm, en plaat voor plaat, aan elkaar verbonden worden. De meest gebruikte stappenvolgorde is dat men eerst het nieuwe materiaal plaatst en verbindt en daarna de productcontour aanbrengt. Daarna wordt het eventuele restmateriaal in de laag alvast opgedeeld in kleine, eenvoudig te verwijderen stukken. Deze twee stappen worden herhaald tot alle lagen zijn aangebracht, waarna alle delen van de lagen die niet tot het product behoren worden verwijderd.

Er zijn vele vlakke-plaatgebaseerde technieken, die allemaal specifieke voor- en nadelen hebben. Drie varianten bespreken we hier in meer detail. MCor heeft een 3D-printprocesvariant ontwikkeld waarbij standaardvellen A4-papier als basis worden gebruikt [8.4]. Deze vellen worden op de normale manier



1 laser
2 verwarmde rol
3 plaatmateriaal
4 aanvoer plaatmateriaal
5 spiegel
6 laserstraal
7 xy-positionering laserstraal
8 huidige laag
9 snijlijn contour
10 vorige laag
11 materiaaloverschot
12 bouwplatform
13 gelaagd product met steunmateriaal

Figuur 8.9 Vlakke-plaatprocesvariant (a) (Custompartnet) en papieren zichtmodel van een hamer (b) (MCor)



1 lijmvoorraadcontainer
2 rol
3 poedervoorraad
4 lift voorraadcontainer
5 bouwkamer
6 lift bouwkamer
7 inktjetprinter
8 product
9 poederbed

Figuur 8.10 Het poederbedlijmproces (a) (Custompartnet). 3D-model voor een metaalgietproces (b) (Voxeljet) en prototype van een robotgripper (c) (Digital Engineering)

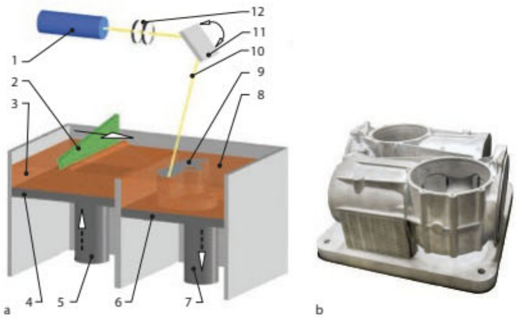
geprint om het eindobject van kleur te voorzien. De stapel papier wordt in de 3D-printer geladen, selectief van lijm voorzien en gestapeld, waarna een snijplotter de contouren van het object in de laag aanbrengt. Andere procesvarianten gebruiken een laser om de contouren aan te brengen. Na het printproces wordt het overtollige papier met de hand verwijderd. Hierdoor is het mogelijk snel, goedkoop en in kleur een 3D-model te printen (figuur 8.9). Omdat het papier en de lijm de sterkte van het object bepalen, worden deze modellen alleen gebruikt voor zichtmodellen en prototypen.
Fabrisonic heeft voor metalen producten een proces ontwikkeld waarbij dunne metalen strips ultrasoon aan elkaar worden gelast. Door het ultrasoon lassen worden de metalen niet gesmolten, maar in vaste toestand aan elkaar verbonden. Hierdoor kunnen ook materialen met zeer verschillende smeltpunten aan elkaar worden verbonden. Dit is bij poederbedprocessen niet mogelijk en bij gefocuste-energiedepositie slechts deels. Ook behouden de gebruikte metalen hun oorspronkelijke mechanische en thermische eigenschappen [8.5]. De productvorm zelf wordt in de laag aangebracht door middel van CNC-frezen.
Vezelversterkte materialen hebben gunstige mechanische eigenschappen, maar zijn, als gevolg van hun vezels, binnen de materiaalaangroeitechnieken lastig te verwerken. Impossible Objects heeft een proces ontwikkeld waarbij met inktjettechnologie het patroon van het eindproduct op een laag losse vezels wordt geprint [8.6]. Deze lagen worden gestapeld, samengeperst en in een oven verbonden. Daarna wordt met behulp van een chemisch of mechanisch proces het overtollige materiaal verwijderd.

8.2.5 Lijmjetten

Standaard **lijmjetprocessen** (**binder jetting technologies**) maken gebruik van een bak met poeder en een of meerdere voorraadcontainers. Een nieuwe laag wordt aangebracht door de bodem van de bouwbak een laagdikte te laten zakken, waarna er met behulp van een roller of mes een nieuwe laag poeder uit de voorraadcontainers wordt opgebracht. Hierna wordt een doorsnede van het product in de poederlaag aangebracht door met behulp van inktjettechnologie selectief lijm op de toplaag aan te brengen.
Een nadeel van dit procestype is dat het eindproducten oplevert waarvan de sterkte wordt bepaald door de gebruikte lijm, niet door het gebruikte poeder. Door aan de lijm kleurstof toe te voegen, kan men op een goedkope manier prototypen in kleur produceren (zie figuur 8.10c). Door de combinatie van de juiste lijmen en poeders te gebruiken, kunnen ook zandmatrijzen voor zandgieten en wasmodellen voor de verloren-wasmethode worden geprint. Met name voor grote metalen onderdelen is het gebruik van geprinte zandmatrijzen of wasmodellen een manier om producten te realiseren met relatief goede nauwkeurigheden en oppervlakte-eigenschappen.

8.2.6 Poederbedfusieprocessen

De algemene opbouw van de poederbedfusiemachines (zie figuur 8.11) vertoont gelijkenissen met

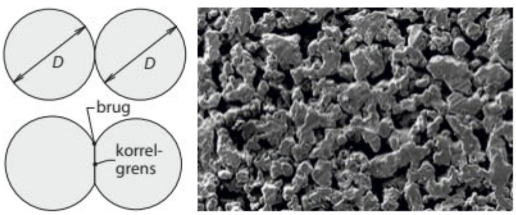


1 laser
2 poederschuif
3 metaalpoedervoorraad
4 metaalpoederplatform
5 metaalpoederlift
6 bouwplatform
7 bouwplatformlift
8 poederbed
9 product
10 laserstraal
11 xy-positioneerspiegel
12 lenzen

Figuur 8.11 Het poederbedfusieproces (a) (Custompartnet) en een met dit proces vervaardigd metalen product (b) (MarinaGrigorivna/Shutterstock)

die van de lijmjetmachines (zie figuur 8.10). De inkjetkop met lijm is bij **poederbedfusieprocessen** (**powderbed fusion processes**) echter vervangen door een gefocuste energiebron, meestal een laser of een elektronenbundel. Door de energiebron wordt energie ingebracht, zodat de poederkorrels selectief aan elkaar kunnen worden gesmolten of gesinterd.

Bij **sinteren** (**SLS, selective laser sintering**) worden de korrels verbonden doordat atomen over de korrelgrens diffunderen en zo voor een vaste verbinding tussen de korrels zorgen. Hierbij blijft de originele korrelvorm (deels) in stand, maar wordt er wel een brug gevormd tussen de twee korrels (zie figuur 8.12a). Er blijft echter sprake van enige ruimte tussen de korrels, waardoor de gevormde producten poreus zijn (zie figuur 8.12b). Omdat sinteren onder de smelttemperatuur van het poedermateriaal plaatsvindt, is het een geschikte verbindingsmethode voor materialen met een heel hoge smelttemperatuur (bijvoorbeeld keramische materialen) of metaallegeringen waarvan de componenten smelttemperaturen hebben die ver uit elkaar liggen. Ook zijn er onderdelen waarbij porositeit juist voordelen biedt, bijvoorbeeld zelfsmerende onderdelen in motoren.
Bij smelten worden de korrels verwarmd tot boven de smelttemperatuur en verdwijnen de korrelgrenzen volledig. Als warmtebron gebruikt men een laser (**SLM, selective laser melting**) of een elektronenbundel (**EBM, electron beam melting**). Door het smelten ontstaat een uniforme materiaalstructuur. Omdat de korrels volledig moeten smelten, zijn met name thermoplastische kunststoffen en zuivere metalen geschikt voor SLM en EBM. Om ervoor te zorgen dat de energiebron slechts een klein beetje extra energie hoeft te leveren, worden de poeders voorverwarmd tot vlak onder verwerkingstemperatuur. Voor het printproces zelf betekent dit dat men rekening moet houden met een lange opwarm- en afkoeltijd.



a b

Figuur 8.12 Het ontstaan van bruggen tussen poederkorrels tijdens het sinterproces (a) en de porositeit van een gesinterd product (b)



a b

Figuur 8.13 Het nesten van de 3D-CAD-modellen in de slicer-software (a) en metalen product met de steunstructuren duidelijk zichtbaar (b) (MarinaGrigorivna/Shutterstock)

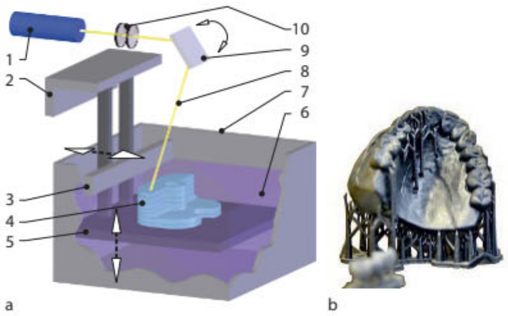
Zowel voor prototypen als functionele producten zijn poederbedfusie van kunststoffen en metalen zeer belangrijke procesvarianten. Voor de kunststofvariant zijn veel verschillende materialen beschikbaar. Poederbedfusie van kunststoffen resulteert in producten met lage oppervlakteruwheden, goede toleranties en hoge sterkten (indien wordt gesmolten; voor sinteren is dit niet het geval). Ook kan de productie-efficiëntie hoog zijn, omdat voor de kunststofvariant het hele bouwvolume gebruikt kan worden (zie figuur 8.13), en niet alleen het bouwplatform (zoals bij materiaalextrusie van kunststoffen). Dit komt doordat voor poederbedfusie van kunststoffen geen steunstructuren nodig zijn. De poedervoorraadbakken en bouwbakken worden voorverwarmd en blijven gedurende het hele printproces op een hogere temperatuur. Deze langdurige verhoging van de temperatuur verlaagt de kwaliteit van de kunststofpoeders. De gebruikte poeders die niet in het product zijn opgenomen, kunnen deels worden hergebruikt. Maximaal 30-50% gebruikt poeder mag aan nieuw poeder worden toegevoegd zonder dat dit de printkwaliteit van het nieuwe onderdeel negatief beïnvloedt.

Bij materiaalaangroeitechnieken voor metalen is het selectief smelten van metaalpoeders het meest gebruikte proces. Dit proces biedt de mogelijkheid gedetailleerde en complexe metalen producten te maken, die een hoge stijfheid en sterkte combineren met een zeer lage porositeit. Om de metaalpoeders te smelten, moet veel warmte worden ingebracht. Dit is een van de grote nadelen van het proces. Er moeten steunstructuren worden aangebracht om te zorgen dat overhangende structuren voldoende worden ondersteund en het gesmolten materiaal niet wegvloeit (zie figuur 8.13b). Daarnaast worden steunstructuren ook aangebracht om de warmte

weg te kunnen leiden naar de metalen bouwplaat en er zo voor te zorgen dat de thermische spanningen die in het product aanwezig zijn niet leiden tot vervorming van het product tijdens het printen. Na het bouwproces moet het product spanningsarm worden gegloeid (zie paragraaf 10.2.1) en van de bouwplaat worden verwijderd. De steunstructuren moeten daarbij worden verwijderd. Ten slotte moeten de functionele vlakken waaraan eisen worden gesteld op het gebied van de ruwheid, vorm of plaatstoleranties worden nabewerkt. Ondanks deze nadelen is de resulterende 3D-printkwaliteit voor complexe en gedetailleerde metalen onderdelen superieur aan bijvoorbeeld metalen onderdelen gemaakt met gefocuste-energiedepositie.

8.2.7 Vatpolymerisatieprocessen

Vatpolymerisatieprocessen beschijnen een laag fotopolymeer selectief, zodat deze fotopolymeren met licht van de juiste golflengte lokaal uitharden. Er zijn twee manieren waarop de machines voor dit proces worden opgebouwd. Een vat kan worden gevuld met vloeistof waar een bouwplatform in zakt dat vervolgens van boven wordt belicht. De tweede variant gebruikt een ondiep vat met een doorzichtige bodem die van onderen wordt belicht. Er zijn ook twee toonaangevende methodes voor de selectieve belichting: men kan kiezen voor een laserbron die iedere pixel individueel belicht, of systemen die gebruikmaken van een beamer en zo een hele laag in één keer belichten.
Machines bedoeld voor grote producten maken gebruik van een in het bad zakkend bouwplatform met laserbelichting van boven (**SLA, stereolithography**, zie figuur 8.14). De lichtintensiteit van de laser bepaalt in combinatie met de belichtingsduur en de lichtgevoeligheid van de vloeistof de indringdiepte, en daarmee de laagdikte. Bij het gebruik van een laser bepaalt de diameter van de focus van de laser de te behalen resolutie, en dus de nauwkeurigheid in het bouwvlak.
Voor kleinere bouwvolumes wordt meestal een omhoogbewegend bouwplatform met belichting van onderen met behulp van een beamer gebruikt (**DLP, digital light processing**). Ondanks de potentieel zeer snelle selectieve uitharding van lagen heeft deze methode twee belangrijke nadelen. Bij belichting met een laser is de resolutie in de laag alleen afhankelijk van de focusdiameter van de laser. Wanneer het patroon op een oppervlak wordt geprojecteerd, is de resolutie van het patroon afhankelijk



1 laser
2 platformlift
3 egalisatieschuif
4 product
5 bouwplatform
6 vloeibare fotopolymeer
7 vat
8 laserstraal
9 xy-scanspiegel
10 lenzen

Figuur 8.14 Stereolithography (SLA-)procesvariant (a) (Custompartnet) en een 3D-geprint model van een gebit, nog met de steunstructuur (b) (MarinaGrigorivna/Shutterstock)

van het aantal pixels van de beamer in combinatie met de grootte van het belichte oppervlak. Hierdoor is de variant die gebruikmaakt van de DLP-techniek niet geschikt voor grote producten. Het tweede nadeel is dat de nieuwe laag na uitharden vast zit aan de vorige laag en de bodem van de container. Om de verbinding met de bodem van de container te verbreken, terwijl de verbinding met eerdere lagen van het product juist in stand moet blijven, moet het product correct worden losgemaakt van de bodem van de container. Er zijn speciale coatings die aanhechting met de containerbodem voorkomen [8.7]. Ook past men methoden toe die ervoor zorgen dat het lospellen lokaal begint, in plaats van over de volledige breedte van de aanhechting. Dit kan bijvoorbeeld worden bereikt door het schuin plaatsen van de containerbodem tijdens het lostrekken of door gebruik te maken van een flexibele vatbodem. Voor beide methoden geldt dat de producten na de productiemethoden een lichtbehandeling ondergaan (*curing*) om hun uiteindelijke mechanische eigenschappen te krijgen. Verder is het aantal lichtuithardende kunststoffen beperkt, wat een mogelijk nadeel is van deze groep processen.

8.2.8 Hybride processen: materiaalaangroeitechnieken en materiaalafnametechnieken

Voor 3D-geprinte onderdelen is de resulterende nauwkeurigheid en oppervlaktekwaliteit vaak niet vergelijkbaar met die van traditionele productieprocessen. Dit kan met name voor functionele onderde-



Figuur 8.15 Een hybride bewerkingscel van DMG Mori (a) en een metaaldepositiegereedschap voor CNC-machines (b) (Hybrid Manufacturing Technologies)

len in samengestelde producten een probleem zijn. De hier besproken hybride productieprocessen combineren 3D-printen met (vijf-assig) frezen. Het produceren van de geometrie en het nabewerken vindt hierbij op één machine plaats. Er zijn twee hybride procesvarianten commercieel verkrijgbaar: processen gebaseerd op poederbedfusie en processen gebaseerd op gefocuste-energiedepositie. Bij poederbedfusieprocessen wordt na enkele geproduceerde lagen het oppervlak nabewerkt, wat resulteert in een verstoring van het poederbed. Bij hybride, op het gefocuste-energiedepositie principe gebaseerde processen kan makkelijker tussen additief en materiaal verwijderend worden gewisseld, omdat hier de verstoring van het poederbed niet optreedt. Naast de hybride machines die speciaal ontwikkeld worden voor deze toepassingen (zie figuur 8.15a) worden er ook metaaldepositiegereedschappen ontwikkeld die in de gereedschapswisselaar van bestaande bewerkingscentra geplaatst kunnen worden (zie figuur 8.15b).

8.3 Voor- en nadelen van 3D-printen

3D-printen heeft een aantal specifieke voordelen, die we in deze paragraaf zullen bespreken. De reden waarom de realisatie van de toekomstscenario's nu nog moeilijk verloopt, kan worden verklaard aan de hand van nog bestaande nadelige aspecten van 3D-printen. Deze beïnvloeden vooral de kosten nadelig. In paragraaf 8.3.3 bespreken we hoe de voordelen kunnen worden omgezet in industrieel succesvolle productieprocessen.

8.3.1 Voordelen

In deze paragraaf bespreken we acht belangrijke procestechnische voordelen van 3D-printen als potentiele basis voor toekomstige productievernieuwing.

Gratis complexiteit

De complexiteit van het te printen onderdeel heeft weinig invloed op de uiteindelijke kosten van het product. Zeer complexe producten leiden in principe alleen tot extra materiaalkosten voor het steunmateriaal, terwijl de printtijd slechts marginaal groter wordt. Hierdoor zijn de productiekosten voor complexe onderdelen grotendeels gelijk aan die van geometrisch eenvoudige producten. Bij andere productietechnieken betekent een verhoging van de complexiteit een (meer dan proportionele) verhoging van de kosten, en soms betekent het zelfs dat een product niet meer gemaakt kan worden.

Korte werkvoorbereiding

De tijd tussen het einde van het ontwerpproces en de uitvoering van de productieprocessen is zeer kort, van enkele minuten tot enkele uren. Enkele uren komt vooral voor indien men een proces gebruikt waarbij bijvoorbeeld steunstructuren handmatig ontworpen moeten worden of waarbij voorverwarmen noodzakelijk is, bijvoorbeeld poederbedfusie.

Geen matrijzen nodig

Voor onder andere gietprocessen zijn matrijzen nodig om producten te kunnen produceren. Deze moeten specifiek ontworpen en geproduceerd worden, wat weken tot maanden in beslag kan nemen. Ook zijn matrijzen onderhevig aan slijtage, waardoor de kwaliteit van de geproduceerde producten varieert en er bovendien regelmatig een nieuwe matrijs moet worden besteld. Voor 3D-printen zijn geen matrijzen nodig. Men heeft dus ook niet te maken met de nadelen die hiermee samenhangen.

Hoge flexibiliteit

Mede door de korte werkvoorbereiding en het matrijsloos produceren ontstaat er een volgend voordeel: veel flexibiliteit in de realisatie van het te produceren product. Indien het nodig is een ontwerp aan te passen en te verbeteren, kan men

daarna direct met de productie en levering beginnen. Dit maakt het bijvoorbeeld mogelijk heel snel op veranderende trends in de markt te reageren.

Locatieonafhankelijkheid

Een 3D-printer stelt weinig eisen aan zijn productieomgeving. Dit betekent dat hij gebruikt kan worden op locaties en in situaties waar de aan- en afvoer van onderdelen moeilijk is. Denk aan op de Noordpool en Zuidpool, in woestijnen en in de ruimte. Ook kan dicht bij de eindgebruiker geproduceerd worden, wat onder andere transportkosten bespaart.

Materiaalvariëteit

3D-printprocesvarianten waarmee meerdere materialen kunnen worden verwerkt in één product, maken het mogelijk functionele eigenschappen van producten te ontwerpen en te realiseren die voorheen onmogelijk waren.

Kennisextensief

Vanwege de eenvoud van het bewerkingsproces is er relatief weinig kennis nodig om een product te ontwerpen voor een 3D-printproces. Vaak zijn eenvoudige ontwerpregels en do's-and-don'ts voldoende om een product te kunnen laten printen. Hierdoor is bijvoorbeeld communicatie via internet vaak voldoende. Er zijn dan ook al veel webgebaseerde 3D-printondernemingen ontstaan, zoals 3D-Hubs, Shapeways en Materialise.

Efficiënt materiaalgebruik

3D-printen maakt gebruik van materiaaltoevoegend produceren, terwijl veel andere processen de uiteindelijke vorm realiseren door materiaal te verwijderen. Zeker wanneer men dure materialen gebruikt en/of wanneer bij een ander productieproces bijna al het materiaal verwijderd moet worden, is 3D-printen een interessant alternatief. Daarnaast kan bij 3D-printen bijvoorbeeld het inwendige van het product hol zijn of worden voorzien van een honingraatstructuur. Dit is bij veel andere technieken niet mogelijk.

8.3.2 Nadelen

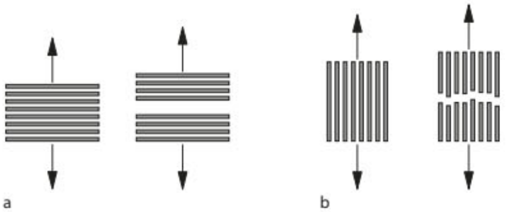
De rooskleurige voorspellingen voor de groei van het gebruik van 3D-printen zijn gebaseerd op de specifieke voordelen die 3D-printen biedt. Hierdoor neemt het een unieke positie in binnen de wereld van de productietechnieken. Er zitten echter ook nadelen aan het proces. Deze nadelen zullen moeten worden geminimaliseerd voordat men aan alle toekomstverwachtingen kan voldoen.

Hoge kosten

Een van de grote nadelen van 3D-printen wordt gevormd door de relatief hoge kosten per geprint onderdeel. Deze worden grotendeels bepaald door de hoge kosten van materialen en machines. Wanneer de kosten voor industriële materiaalaangroeiprocessen worden vergeleken met die voor het spuitgieten van kunststoffen en het gieten van metalen, dan blijken de materialen voor 3D-printen 10 (metaal) tot 32 (kunststoffen) keer duurder dan de materiaalvarianten voor de traditionele processen [8.8]. Verder zijn ook de kosten van professionele productiemachines (€ 10.000-€ 1.000.000) aanzienlijk. Door de lange printtijden hebben deze machinekosten een grote invloed op de kostprijs per geproduceerd product.
Als de productiekosten worden vergeleken met processen waarbij een matrijs wordt gebruikt, zijn de materiaalaangroeiprocessen alleen goedkoper voor lage productieaantallen. Bij verspanende technologieën worden de kosten met name bepaald door de complexiteit van de geometrie. Wanneer men alleen kijkt naar geometrieën die verspaanbaar zijn, dan zijn op dit moment alle 3D-printtechnologieën voor metalen duurder dan de verspanende varianten [8.9]. Er zal pas een omslag komen in het voordeel van 3D-printen indien de 3D-printmachines acht keer sneller kunnen produceren.
Wel kan men door het gebruik van 3D-printtechnieken op andere vlakken kosten besparen. Zo kunnen assemblages in één keer geprint worden. Daarnaast kan men door herontwerpen een goedkopere geometrie creëren voor het printproces en kan men door lokaal te produceren logistieke kosten besparen.

Lange productietijden

Afhankelijk van het type proces bestaat het produceren van een product uit het instellen van de machine, het opwarmen, het daadwerkelijk laten aangroeien van het product, het afkoelen en eventueel het nabewerken. Voor metaal zijn de aangroeisnelheden in poederbedfusieprocessen



Figuur 8.16 Verschillen in sterkte van 3D-geprinte structuren, in Z-richting (a) en in X- en Y-richting (b) (Sculpteo)

bijvoorbeeld ongeveer 10-100 gr/uur. Inclusief opwarmen en afkoelen van de machine (en nog exclusief eventueel nabewerken) is een productiecyclus van 24 uur voor één bouwcyclus eerder standaard dan uitzondering.

Andere materialen en materiaaleigenschappen

Materiaalaangroeitechnieken zijn complex, en alle onderdelen in dat complexe proces hebben invloed op de kwaliteit van het geprinte product. De gebruikte materialen worden speciaal voor materiaalaangroeiprocessen ontwikkeld. Hierdoor is het aantal beschikbare materialen beperkt, alhoewel dit aantal snel groeit. Senvol laat 1300 commercieel verkrijgbare materialen voor 3D-printen zien [8.10]. De producten die hiermee worden geproduceerd, hebben materiaaleigenschappen die afwijken van de materiaaleigenschappen die bepaald zijn door gestandaardiseerde materiaalproeven voor conventioneel geproduceerde materialen. De materiaaleigenschappen in het resulterende product zijn vaak sterk anisotroop, waarbij de haalbare stijfheid en sterkte in een laag zelfs nog vergelijkbare waardes voor standaardmaterialen laten zien (zie figuur 8.16b). Deze waarden verminderen sterk indien het gekozen printproces resulteert in poreuze eindproducten. De vergelijkbare mechanische waarden gelden niet voor de richting loodrecht op de laagstructuur. Daarbij bepaalt de aanhechting tussen de lagen namelijk de mechanische eigenschappen, in plaats van het materiaal zelf (zie figuur 8.16b). Ook is de haalbare breukrek vaak substantieel lager, zowel in de laag zelf als daar loodrecht op. Ten slotte vereist het basismateriaal vaak speciale opslagcondities om te zorgen dat de kwaliteit van het materiaal niet degradeert, bijvoorbeeld door de inwerking van licht of luchtvochtigheid op het basismateriaal.

Noodzaak tot nabewerken

In veel gevallen zijn de producten na het printproces nog niet klaar voor gebruik en moeten er nabewerkingsstappen worden uitgevoerd. Bij bijna alle processen moet bijvoorbeeld restmateriaal worden verwijderd. Dat kan gaan om steunstructuren, maar ook om los poeder of een teveel aan fotopolymerisatievloeistof. Ook zijn secundaire processtappen vaak noodzakelijk om de gewenste materiaaleigenschappen te verkrijgen. Voorbeelden van dit soort stappen zijn spanningsvrij gloeien van metaalstructuren, warm isostatisch persen om de porositeit te verminderen en het verder uitharden van fotopolymerisatieproducten in een uv-oven. Ten slotte zijn de oppervlaktekwaliteit en de beoogde nauwkeurigheid vaak niet naar wens. Men past daarom vaak nog mechanische nabewerkingen toe, zoals trommelen en verspanen. Het belang van het gebruik van nabewerkingsmethoden is afhankelijk van het gekozen printproces en het beoogde gebruik.

Noodzaak tot herontwerpen

Wanneer bedrijven materiaalaangroeitechnieken onderzoeken als alternatief voor bestaande combinaties van product en productieproces, zonder dat ze het product herontwerpen voor materiaalaangroeitechnieken, zijn ze meestal teleurgesteld in het resultaat. De geprinte kopie van het product is duurder, heeft andere mechanische en geometrische eigenschappen en moet nabewerkt worden. Om optimaal gebruik te maken van de voordelen die 3D-printen biedt, moeten het product én de hele ontwerp- en productiefase worden geoptimaliseerd voor 3D-printen. Met name op het gebied van product(her)ontwerp voor 3D-printen zijn veel ontwerpers nog niet of onvoldoende opgeleid. Ze moeten de voordelen van 3D-printen (vormvrijheid, samengestelde onderdelen terugbrengen tot één onderdeel enzovoort) weten te combineren met de randvoorwaarden die een specifiek proces stelt aan de geometrie (minimale wanddiktes, minimale vormafmetingen enzovoort).

Veiligheid

Vanwege de nieuwheid van de processen zijn nog niet alle veiligheidsrisico's (voor de lange termijn) volledig in kaart gebracht. De in poederbedfusieprocessen gebruikte metaalpoeders kunnen de ogen en

de luchtwegen irriteren [8.11]. Ook zouden de poeders bij opname in het lichaam kankerverwekkend kunnen zijn. Om dit te voorkomen is het dragen van beschermende kleding noodzakelijk en dienen voldoende filters in de werkruimte geïnstalleerd te zijn. Verder zijn de poeders (ook de lasdampen die bij poederbedfusieprocessen ontstaan) licht ontvlambaar. Ten slotte zijn de gebruikte lasers bij verkeerd gebruik gevaarlijk voor de huid en ogen. Met name door de nieuwheid van de processen zijn er nog geen studies uitgevoerd naar langdurige blootstelling aan deze poeders. De gebruikte vloeistoffen in vatpolymerisatieprocessen zijn chemicaliën en moeten ook als zodanig behandeld worden [8.12]. Wanneer ze gebruikt worden, moet men dus beschermende handschoenen dragen en de resulterende geprinte producten zijn niet geschikt voor gebruik in combinatie met voedsel of voor gebruik in of op het lichaam. Bij het thuisgebruik van extrusieprinters voor kunststoffen komen grote hoeveelheden minuscule deeltjes (tot 10^{11}/minuut) vrij, waarvan het effect op de gezondheid nog onbekend is [8.13]. De komende jaren zal nog veel onderzoek gedaan moeten worden om alle mogelijk negatieve effecten van deze nieuwe productieprocessen volledig in kaart te brengen.

Het ontbreken van standaarden en certificering

Veel van de kwaliteitsstandaarden die de kwaliteitsaspecten van de materiaalaangroeiprocesketen definiëren zijn nog niet ontwikkeld. Het ontbreken van deze standaarden zorgt ervoor dat het produceren van hoogwaardige producten een lange zoektocht is naar de juiste combinatie van materialen, processen en machine-instellingen. Indien producten worden gebruikt in veiligheidskritische omstandigheden, is certificering van het product noodzakelijk. Daarvoor moet de producent aantonen dat hij het product continu kan produceren zonder dat dit veiligheidskritische kwaliteitsproblemen oplevert. Voor vliegtuigonderdelen is vermoeiingssterkte bijvoorbeeld zeer belangrijk. Deze wordt niet alleen bepaald door de geometrie en het gebruikte materiaal, maar ook door de lokale oppervlakteruwheid en de locatie, vorm en grootte van de inwendige holtes die bij porositeit horen.

8.3.3 Toepassingsgebieden

3D-printen is breed toepasbaar. De toepassingsgebieden zijn onder te verdelen in vier hoofdgroepen:



a



b

Figuur 8.17 Herontwerp van een metalen vliegtuigscharnier met gebruik van topologie-optimalisatie (a) (Altair) en een onderdeel voor LEAP-vliegtuigmotoren (b) (3dprintingbusiness)

1. **Rapid prototyping**, het snel maken van proefmodellen om het innovatieproces te versnellen.
2. **Rapid tool manufacturing**, het produceren van gereedschappen, waarbij de mogelijkheden van de printtechnieken het gereedschap mogelijk kunnen verbeteren.
3. **Rapid manufacturing**, het met 3D-printen produceren van eindproducten in (nu nog) kleine series.
4. **Mass customization**, het in grote aantallen 3D-printen van unieke producten (gehoorapparaten, bijvoorbeeld).

In deze paragraaf bespreken we voorbeelden van productgroepen waarvoor het niet alleen technisch mogelijk is 3D-printen toe te passen, maar waar de toepassing van materiaalaangroeitechnieken ook al een significante impact heeft gehad. Het gaat om de volgende productgroepen: lichtgewicht producten, medische producten, (spuitgiet)matrijzen en reserveonderdelen.

Lichtgewicht producten

Voor de vliegtuigindustrie heeft vooral de mogelijkheid om lichtgewicht producten te maken grote voordelen. Automatische generatieprogramma's (topologie-optimalisatiesoftware, zie literatuurverwijzing 8.14) worden gebruikt om de geometrie van deze lichte maar ook vaak grillig gevormde onderdelen te definiëren (zie figuur 8.17a). De betreffende onderdelen kunnen alleen gemaakt worden met 3D-printtechnieken, in veel gevallen poederbedsmeltprocessen voor metaalpoeders. De hoge kosten van 3D-printen worden terugverdiend in de gebruiksfase van het vliegtuig, door lagere brandstofkosten en een lagere kooldioxide-uitstoot [8.15]. Een tweede voorbeeld van het gebruik van

3D-printtechnieken binnen deze industrietak is het herontwerp van het brandstofinspuitstuk voor LEAP-vliegtuigmotoren (zie figuur 8.17b). Door de overgang op materiaalaangroeitechnieken kon een herontwerp van het product worden gemaakt met meerdere voordelen: één onderdeel in plaats van twintig onderdelen, 25% lichter en 500% duurzamer. De verwachting is dat er in 2020 ruim 100.000 van deze brandstofinspuitstukken geproduceerd en in gebruik zullen zijn. De auto-industrie staat nu ook op het punt 3D-printen substantieel in te gaan zetten.



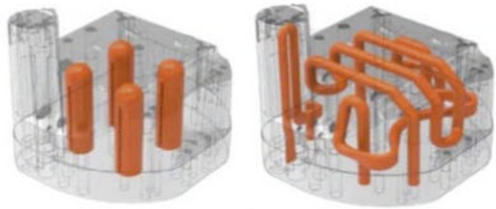
Figuur 8.18 Tientallen gepersonaliseerde gehoorapparaten op een enkel bouwplatform (Aniwaa) [8.17]

Medische producten

In bijvoorbeeld de tandheelkunde nemen materiaalaangroeitechnieken een steeds belangrijkere plaats in. Producten zoals kronen zijn allemaal uniek, en met de combinatie van 3D-scannen en 3D-printen is het mogelijk om efficiënt een perfect passende kroon te produceren. Vanwege de afmetingen en de gewenste oppervlaktekwaliteit en nauwkeurigheid worden hiervoor vatpolymerisatie en materiaaljetprocessen gebruikt. Voor porseleinen kronen wordt de tand eerst gescand. Vervolgens wordt er een wasmodel geprint dat via de verloren-wasmodelmethode wordt omgezet in een metalen basis van de kroon. Op deze metalen basis wordt dan weer porselein aangebracht [8.16]. Ook ortheses, protheses en operatieondersteunende gereedschappen worden steeds vaker vervaardigd met 3D-printen.
Net als in de tandheelkunde worden voor de productie van gehoorapparaten de goede eigenschappen van vatpolymerisatieprocessen gebruikt in combinatie met 3D-scantechnieken. Voor geïndividualiseerde gehoorapparaten wordt de kunststofbehuizing voor de elektronica rechtstreeks geprint (zie figuur 8.18). Hierdoor is een voorheen zeer arbeidsintensieve industrie bijna geheel geautomatiseerd. In 2013 waren er al meer dan 10.000.000 3D-geprinte gehoorapparaten op de markt, terwijl op dit moment 95% van de gehoorapparaten 3D-geprinte onderdelen bevat.

(Spuitgiet)matrijzen

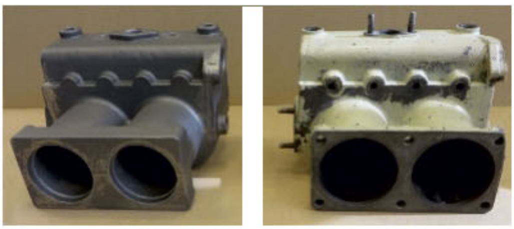
Kleine matrijzen die gebruikt worden voor proefseries of korte productieseries kunnen worden geprint door middel van vatpolymerisatieprocessen. Onder andere door korte vezels aan de vloeistof toe te voegen kan de levensduur van de



a b

Figuur 8.19 Origineel (a) en herontwerp (b) van de koelkanalen (oranje) voor de productie van watermeterbehuizingen (Autodesk)

matrijs verlengd worden. Daarnaast bieden materiaalaangroeitechnieken de mogelijkheid om de koelkanalen willekeurig te vormen en deze kort onder het oppervlak van de matrijs te plaatsen. Bij deze laatste optie worden poederbedsmeltprocessen voor metaalpoeders gebruikt. Meestal wordt overigens niet de hele matrijs geprint, maar alleen inzetstukken voor de delen van de matrijs die het langzaamst afkoelen. Door de verbeterde efficiëntie van het spuitgietproces (tot 50% reductie van de afkoelfase) worden de extra kosten van het 3D-printen terugverdiend. In figuur 8.19 zijn de koelkanalen geoptimaliseerd. Daardoor zijn ze



a b

Figuur 8.20 Gegoten metalen twee-cilindermotorblok (a); de matrijs voor het gietproces is 3D-geprint op basis van een 3D-scan van het originele motorblok (b) (3Dealize)

alleen nog via 3D-printen te vervaardigen. In het nieuwe ontwerp zijn de temperatuurverschillen in de matrijs aanzienlijk lager (5 °C in plaats van 50 °C), waardoor er minder thermische restspanningen en deformaties voorkomen in het eindproduct en er dus minder afkeur is. Daarnaast werd de cyclustijd met 40% gereduceerd. Dit resulteerde in een besparing van € 14000 bij een oplage van 100.000 stuks.

Reserveonderdelen

Toekomstscenario's voorspellen dat binnen afzienbare tijd 50% van de (reserve)onderdelen door 3D-printen vervaardigd zal worden. Op dit moment is dat nog niet het geval. De potentie van 3D-printen voor deze industrietak is echter groot; het on demand printen van reserveonderdelen heeft grote voordelen ten opzichte van het aanleggen en onderhouden van grote hallen met reserveonderdelen, die mogelijk nooit gebruikt gaan worden. Op dit moment is het maken van reserveonderdelen nog beperkt tot het printen van waardevolle, zeldzame of oude reserveonderdelen. Men kan bijvoorbeeld een versleten onderdeel van oude auto's scannen, zodat het later weer gegoten kan worden (zie figuur 8.20). De scan wordt bewerkt, zodat alle gevolgen van slijtage worden verwijderd en het onderdeel wordt geoptimaliseerd voor het gietproces. De mal voor het gietproces wordt geprint met speciale zandpoeders en lijmen die geschikt zijn voor gietprocessen voor metalen. Met deze serie processtappen kan de totale doorlooptijd van de productie met 80% worden verkort en is het product bovendien 90% goedkoper dan wanneer het wordt voortgebracht met conventionele productiemethoden [8.18].

Samenvatting

Met materiaalaangroeitechnieken (3D-printen) bedoelen we productieprocessen die producten realiseren door het laag voor laag laten aangroeien van materiaal. Binnen een laag zorgt het gereedschap ervoor dat het materiaal alleen daar aangroeit waar het productmateriaal zich behoort te bevinden. Omdat het gereedschap zich boven de te vormen laag bevindt, en dus geen directe interactie met de laag heeft die gebouwd wordt, kan de laag zeer complex worden opgebouwd, terwijl de aansturing van het gereedschap relatief eenvoudig blijft. Door de stapeling van zeer veel complexe lagen kan de geometrie van het meest complexe product op een eenvoudige manier benaderd worden.
Materiaalaangroeitechnieken hebben een aantal voor- en nadelen die voor alle procesvarianten gelden.

Voordelen:
- gratis complexiteit;
- korte werkvoorbereiding;
- matrijsloos produceren;
- hoge flexibiliteit;
- materiaalvariëteit;
- kennisextensief;
- locatieonafhankelijk produceren;
- efficiënt materiaalgebruik.

Nadelen:
- hoge kosten;
- lange productietijden;
- andere materialen en materiaaleigenschappen;
- noodzaak tot nabewerken;
- noodzaak tot herontwerpen;
- veiligheid;
- ontbreken van standaarden en certificering.

Door de eenvoudige opbouw van materiaalaangroeitechnieken zijn er veel verschillende procesvarianten ontwikkeld, allemaal met hun eigen specifieke voor- en nadelen. Deze varianten zijn opgedeeld in zeven hoofdgroepen.
1. Materiaalextrusie.
2. Materiaaljetten.
3. Gefocuste-energiedepositie.
4. Vlakke-plaatprocessen.
5. Poederbedlijmprocessen.
6. Poederbedfusieprocessen.
7. Vatpolymerisatieprocessen.

Door de grote populariteit van materiaalaangroeiprocessen worden continu nieuwe procesvarianten ontwikkeld, waardoor er voor de meeste procesgroepen varianten zijn ontstaan voor keramische, metalen, kunststof en vezelversterkte eindproducten. Ook ontstaan er hybride processen die de grenzen van de beschreven hoofdgroepen overschrijden.

Literatuur

8.1 Wohlers, T. *Wohlers Report 2014. 3D-Printing and Additive Manufacturing State of the Industry*. 2014.

8.2 ASTM. *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (Designation: F2792-12a)*. s.l. : ASTM, 2013.

8.3 xjet 3D. *xjet 3D*. [Online] geciteerd: 11 oktober 2017. http://xjet3d.com/.

8.4 Mcor. [Online] 10 oktober 2017. http://mcortechnologies.com.

8.5 Zhang S., Yi D. Zhang H., Zheng L., Zhang Y., Yang Z., Norfolk M. Towards Understanding of Ultrasonic Consolidation Process With "Process Map". *Rapid Prototyping Journal*. 2015, pp. 461-468.

8.6 Impossible Objects. [Online] 10 oktober 2017. http://impossible-objects.com/.

8.7 3-D Printing Just Got 100 Times Faster. *The Atlantic*. [Online] 17 maart 2015. https://www.theatlantic.com/technology/archive/2015/03/3d-printing-just-got-100-times-faster/388051/.

8.8 Thomas D., Gilbert S. *NIST Special Publication 1176. Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing*. s.l. : NIST, 2014.

8.9 Hällgren S. Pejryd L., Ekengren J. Additive Manufacturing and High Speed Machining – Cost Comparison of Short Lead Time Manufacturing Methods. *Procedia CIRP 50* . 2016, pp. 384-389.

8.10 Industrial Additive Manufacturing Materials and Machines. *Senvol*. [Online] Senvol. http://senvol.com/database/.

8.11 Safety Tips for Metal AM. *Additive Manufacturing*. [Online] 23 maart 2016. https://www.additivemanufacturing.media/blog/post/safety-tips-for-metal-am.

8.12 Resin Safety. *Formlabs*. [Online] 11 oktober 2017. https://support.formlabs.com/hc/en-us/articles/115000008264-Safety.

8.13 Qian Zhang, Jenny P. S. Wong, Aika Y. Davis, Marilyn S. Black & Rodney J. Characterization of Particle Emissions From Consumer Fused Deposition Modeling 3D-Printers. *Aerosol Science and Technology*. 2017.

8.14 Topology Optimization Joins the Mile High Club. *Altair*. [Online] 29 juni 2012. http://altairenlighten.com/opinion/topology-optimization-joins-the-mile-high-club/.

8.15 Additive Manufacturing and Cost per Kilogram. *Additive Manufacturing*. [Online] 6 oktober 2015. https://www.additivemanufacturing.media/blog/post/additive-manufacturing-and-cost-per-kilogram.

8.16 3D-Printing and 3D-Scanning for Dental Labs and Digital Dentistry. *Aniwaa*. [Online] 11 oktober 2017. http://www.aniwaa.com/3d-scanning-and-3d-printing-for-the-dental-industry/.

8.17 Digital Hearing Aids. *Shining 3D*. [Online] [geciteerd: 21 oktober 2017.] http://en.shining3d.com/solution__detail-4165.html.

8.18 3Dealise. *3Dealise*. [Online] 11 oktober 2017. https://www.3dealise.com/doc/15499-Case-Remanufacturing-a-Century-Old-Colibri-Engine.pdf.

8.19 Quan Z., Wu A., Keefe M. et al. Additive Manufacturing of Multi-directional Preforms for Composites: Opportunities and Challenges. *Materials Today*. mei 2015.

Oefenvragen

8.1 Alle in dit hoofdstuk besproken materiaalaangroeitechnieken maken gebruik van een laagsgewijze opbouw van de producten. Wat zijn belangrijke voor- en nadelen van deze laagsgewijze opbouw?

8.2 Bepaalde processen vereisen steunstructuren om ervoor te zorgen dat de geometrische complexiteit van een product gerealiseerd kan worden. Waarom worden steunstructuren gebruikt? Wat zijn de nadelen van het gebruik van deze steunstructuren?

8.3 Welke procesgroep(en) zou je overwegen indien snel en tegen lage kosten een klein product (40 × 40 × 40 mm) van kunststof 3D-geprint moet worden in een oplage van 300 stuks? Het oppervlak van de bouwplaat/bouwplatform is 320 × 320 mm. Geef aan waarom deze procesgroep(en) gekozen is/zijn?

8.4 In industrieën waar een lage massa van producten essentieel is, wordt vaak topologie-optimalisatiesoftware gebruikt om de geometrie te definiëren. Waarom zijn topologie-optimalisatie en materiaalaangroeitechnieken onlosmakelijk met elkaar verbonden?

8.5 Er zijn veel procesvarianten die metalen eindproducten leveren. Welke zes procesvarianten kunnen hiervoor worden gebruikt? Welke variant zou je adviseren voor het produceren van een groot metalen object? Waarom?

8.6 Waarom moeten producten die worden gemaakt met materiaalaangroeitechnieken meestal worden nabewerkt? Geef twee voorbeelden van nabewerkingsstappen.

8.7 Wat zijn de belangrijkste verschillen tussen het STL- en AMF-bestandsformaat? Waar worden deze bestandsformaten voor gebruikt?

8.8 Een van de belangrijkste nadelen van materiaalaangroeitechnieken zijn de hoge kosten. Waardoor worden deze veroorzaakt? Noem minimaal drie oorzaken.

8.9 Zowel materiaaljetten als vatpolymerisatie kunnen resulteren in kunststof eindproducten met goede oppervlaktekwaliteit en toleranties. Wat zijn belangrijke overeenkomsten en verschillen tussen materiaaljetten en vatpolymerisatie van fotopolymerisatiekunststoffen?

inclusief website!

Op www.industrieleproductie.nl vind je de antwoorden op deze vragen, maar ook extra studie- en oefenmateriaal, zoals video's en meer opgaven.

9 Verbinden

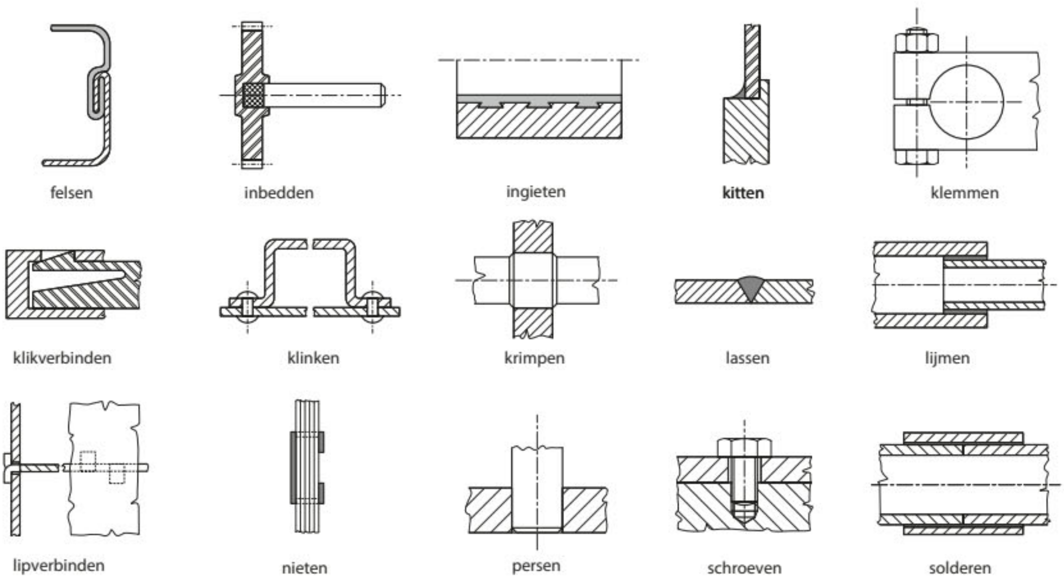
In dit hoofdstuk geven we een overzicht van de belangrijkste verbindingstechnieken aan de hand van een systematische indeling. We behandelen de principes van de verbindingsmethoden, de wijze van aanbrengen van de verbindingen en de toepassingsgebieden. Daarnaast bevat dit hoofdstuk constructieve aanwijzingen voor de uitvoering van verbindingen gericht op een effectieve en efficiënte productie.

9.1 Inleiding

Veel producten worden samengesteld uit onderdelen. Deze onderdelen moeten zo met elkaar worden verbonden dat de constructie de bedoelde functie kan uitoefenen en de optredende belastingen kan weerstaan. In dit hoofdstuk richten we ons uitsluitend op gevallen waarin onderdelen onbeweeglijk met elkaar verbonden worden. Deze verbindingen noemen we **starre verbindingen**. Verbindingen waarbij bewegingsmogelijkheden aanwezig zijn, vallen hier dus niet onder.
Aan verbindingen worden uiteenlopende eisen gesteld, bijvoorbeeld op het gebied van sterkte, vloeistof- en gasdichtheid, uiterlijk, snelle montage en soms ook demontage. Er bestaan dan ook veel verschillende verbindingsmethoden. Figuur 9.1 geeft een overzicht van de meest gangbare verbindingen.

In dit hoofdstuk richten we ons in het bijzonder op de fabricagetechnische aspecten van de verbindingen:
- de verbindingsprocessen;
- de vereiste apparatuur;
- de benodigde tijd en de kosten;
- de kwaliteitsbeheersing bij de fabricage van verbindingen.

We besteden geen aandacht aan het ontwerpen van verbindingen en de bijbehorende sterkteberekeningen. Ook gaan we vrijwel niet in op de materiaalkundige aspecten, ook al zijn die uitermate belangrijk voor het realiseren van lijm- en soldeerverbindingen, en voor het realiseren van lasverbindingen al helemaal.



Figuur 9.1 Beperkt overzicht van verbindingsmethoden

9.2 Indeling van de verbindingsmethoden

We kunnen de talrijke verbindingsmethoden alleen behandelen door ze in te delen in onderling verwante groepen. Dit kunnen we doen vanuit verschillende oogpunten, bijvoorbeeld op grond van losneembaarheid, op grond van het verbindingsprincipe en op grond van de geometrie van de verbinding.

9.2.1 Indeling op grond van losneembaarheid

Een belangrijk criterium voor de keuze van een verbindingsmethode is de mate van losneembaarheid.

Losneembare verbindingen kunnen eenvoudig worden losgenomen en opnieuw worden aangebracht zonder dat de onderdelen beschadigen. Dit speelt vooral een rol bij onderhoud, reparatie of hergebruik. Dit is een belangrijke reden voor het gebruik van schroefverbindingen.

Beperkt losneembare verbindingen zijn met enige moeite los te nemen. Enige schade aan de onderdelen is hierbij niet altijd te vermijden. De onderdelen worden niet afgekeurd door de omvang van die schade, maar de verbindingselementen of -materialen wel. Voorbeelden van dit soort verbindingen zijn klinkverbindingen en soldeer- en lijmverbindingen. Door ze te verwarmen zijn deze losneembaar.

Niet-losneembare verbindingen kunnen alleen met moeite worden verbroken, en meestal beschadigen de onderdelen daarbij. Voorbeelden van dit soort verbindingen zijn fels-, las- en krimpverbindingen.

9.2.2 Indeling op grond van het verbindingsprincipe

We onderscheiden de volgende verbindingsprincipes:
- verbinden met gebruik van verbindingsmateriaal;
- verbinden met gebruik van verbindingselementen;
- vormverbindingen.

De bijbehorende verbindingen vind je terug in figuur 9.1

Verbinden met gebruik van **verbindingsmateriaal** noemt men ook wel **materiaalverbinden**. Hiertoe behoren:
- **lasverbindingen**, waarbij de verbinding tot stand komt door de te verbinden delen plaatselijk in deegachtige toestand te brengen of tot smelten te brengen. In het laatste geval wordt daarbij meestal **toevoegmateriaal** gebruikt. Toevoegmateriaal heeft meestal (vrijwel) dezelfde chemische samenstelling en dus hetzelfde smeltpunt als de te verbinden delen;
- **soldeerverbindingen**, waarbij de verbinding ontstaat door het smelten en vervolgens laten stollen van een tussenlaag. Deze tussenlaag noemen we het **soldeer**, het is een metaallegering met een lager smeltpunt dan dat van de onderdelen;
- **lijmverbindingen**, waarbij de verbinding wordt verkregen door het laten uitharden van een dunne laag organisch materiaal, de **lijm**, tussen de te verbinden vlakken;
- **kitverbindingen**, waarbij de ruimte tussen de beide onderdelen wordt gevuld met een relatief dikke lijmlaag, de **kit**.

Bij verbinden met gebruik van **verbindingselementen** (delen met een vaste vorm) onderscheiden we twee principes:
- De verbindingselementen ondergaan een plastische vervorming, zoals bij klinknagels en nieten. Dit levert een beperkt losneembare verbinding op.
- De verbindingselementen ondergaan geen plastische vervorming, zoals bij schroeven, bouten en moeren.

Bij vormverbindingen komt de verbinding tot stand door de vorm van de onderdelen zelf. Hierbij worden geen verbindingsmaterialen of verbindingselementen gebruikt. Voorbeelden van vormverbinden zijn:
- **klikverbindingen** of **snapverbindingen**. De verbinding komt tot stand door de te verbinden onderdelen aan elkaar te koppelen, waarbij uitsluitend elastische vervorming optreedt. Deze verbindingen zijn in principe losneembaar.
- **pers-** en **krimpverbindingen**. De verbinding wordt in stand gehouden door wrijvingskrachten in een constructie met een negatieve onderlinge speling. Bij persen worden de onderdelen met kracht in elkaar gedrukt. Bij krimpen wordt tijdelijk een positieve speling verkregen door de delen te verwarmen en/of af te koelen. De passing en het

temperatuurverschil moeten zo worden berekend dat na egalisatie van de temperaturen de vereiste klemspanning optreedt. Deze verbindingen zijn beperkt losneembaar.
- **omvormverbindingen**. De verbinding komt tot stand door plastische vervorming van ten minste een van de te verbinden onderdelen. Deze verbindingen zijn niet losneembaar;
- **schroefverbindingen**, waarbij één of meer onderdelen zelf voorzien zijn van schroefdraad.

9.2.3 Indeling op grond van de geometrie van de verbinding

We maken hierbij onderscheid tussen puntverbindingen, lijnverbindingen en vlakverbindingen.

Puntverbindingen zijn beperkt van afmetingen. De meeste verbindingen die gebruikmaken van verbindingselementen behoren tot de puntverbindingen. Ook puntlasverbindingen behoren tot deze categorie.

Lijnverbindingen hebben een betrekkelijk grote lengte in één richting. Lasnaadverbindingen zijn hiervan het bekendste voorbeeld.

Vlakverbindingen strekken zich uit over een relatief groot oppervlak. De bekendste voorbeelden hiervan zijn soldeer- en lijmverbindingen.

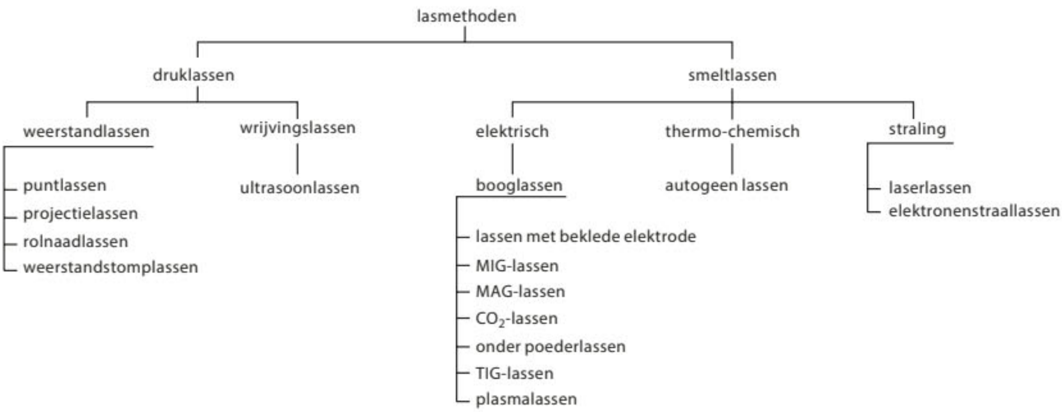
9.2.4 Overige verbindingsmethoden

Niet alle verbindingsmethoden kunnen we indelen volgens de indelingen die we hebben beschreven. Dat geldt bijvoorbeeld voor de volgende methoden:
- **ingieten**, hierbij wordt het ene onderdeel ingegoten in een ander onderdeel. Deze methode wordt onder andere toegepast bij een lagerschaal in een huis (zie figuur 9.1);
- **inbedden**, hierbij wordt een onderdeel in de gietvorm van een ander onderdeel geplaatst. Deze methode wordt bijvoorbeeld gebruikt om metalen onderdelen vast met kunststof onderdelen te verbinden (zie figuur 9.1);
- **insert-techniek**. Bij het spuitgieten van kunststof delen kunnen metalen onderdelen (inserts), in het product worden opgenomen op plaatsen waar tijdens het gebruik sterke slijtage kan optreden. Een voorbeeld hiervan is een gat voorzien van schroefdraad, waar de schroef vaak in- en uitgedraaid moet worden,
- **outsert-techniek**. In frames vervaardigd van metaalplaat moeten vaak op veel plaatsen lagerbusjes en andere onderdelen zoals steunen en dergelijke worden aangebracht. Al deze toevoegingen (outserts) kunnen in één keer worden aangebracht door spuitgieten van kunststof.

Deze overige verbindingsmethoden laten we in dit hoofdstuk verder buiten beschouwing.

9.3 Lassen

Lassen is een breed en veelzijdig vakgebied. Er bestaan veel verschillende lastechnieken. Het schema in figuur 9.2 geeft hiervan een overzicht. In dit schema zijn alleen de lasprocessen opgenomen die we in dit hoofdstuk behandelen. Laserlassen hebben we behandeld in hoofdstuk 6.



Figuur 9.2 Overzicht van lasmethoden

Bij **druklassen** worden de delen met grote kracht op elkaar gedrukt. In de meeste gevallen worden ze daarbij verhit tot ze in een deegachtige toestand komen of zeer plaatselijk smelten.

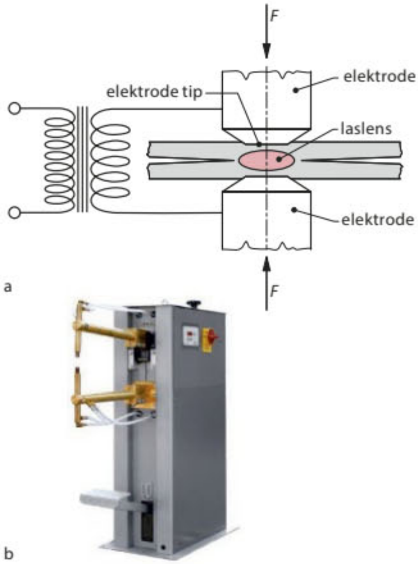
Bij **smeltlassen** worden de delen tot boven het smeltpunt verhit met behulp van een elektrische vlamboog, een thermochemische reactie of door straling. Smeltlassen is mogelijk wanneer de smeltpunten van de te verbinden materialen ongeveer aan elkaar gelijk zijn en de beide materialen in gesmolten toestand goed mengbaar zijn. Ook het toevoegmateriaal moet aan deze eisen voldoen. In verband met de haalbare laskwaliteit wordt smeltlassen bij voorkeur toegepast voor het verbinden van onderdelen uit gelijke materialen. In de meeste gevallen wordt hetzelfde toevoegmateriaal gebruikt als dat van de te verbinden onderdelen. De las heeft dan in principe dezelfde mechanische eigenschappen als het moedermateriaal. Verschillen kunnen optreden door verschillen in het temperatuurverloop tijdens de afkoeling van het werkstuk na het lassen. Hierdoor kunnen andere structuren ontstaan (zie paragraaf 9.3.5).
De meeste smeltlasverbindingen zijn lijnverbindingen.

Lassen wordt het meest toegepast bij metalen. Het is echter ook goed mogelijk bij thermoplasten. We bespreken in deze paragraaf druklassen van metalen, druklassen van kunststoffen, booglassen en autogeen lassen. Verder gaan we in op temperatuureffecten bij lassen, de vormgeving van lasverbindingen en kwaliteitsbeheersing.

9.3.1 Druklassen van metalen

Weerstandlassen

Bij **weerstandlassen** drukken twee geleidende **elektroden** de onderdelen plaatselijk op elkaar (zie figuur 9.3). Bij doorgang van een elektrische stroom ontstaat op de grens tussen de delen de sterkste warmteontwikkeling en smelt het materiaal. Wanneer men de stroomdoorgang beëindigt, stolt het materiaal weer. Hierdoor komt de verbinding tot stand. De voorwaarden om dit te bereiken zijn:
- de te verbinden materialen moeten elektrisch geleidend zijn en ongeveer hetzelfde smeltpunt hebben;
- de elektroden moeten goed elektrisch geleidend zijn en een hoog smeltpunt hebben;



Figuur 9.3 Weerstandlassen: lasprincipe (a) en puntlasmachine (b) (Rilas)

- in korte tijd moet voldoende energie worden toegevoerd. Hiervoor is een hoge stroomdichtheid (500-1000 A/mm^2) noodzakelijk;
- de overgangsweerstand bij de las moet hoog genoeg zijn om voldoende warmteontwikkeling te verkrijgen;
- de overgangsweerstand op de plaatsen waar de elektroden het werkstuk raken moet lager zijn dan die bij de las, om vastlassen van de elektroden te voorkomen. Zo nodig kunnen de elektroden worden gekoeld.

Een aantal uitvoeringsvormen van het weerstandlassen bespreken we hieronder.

Bij **puntlassen** worden staafvormige elektroden gebruikt. Bij de puntlasmachine zijn de volgende grootheden onafhankelijk van elkaar in te stellen:
- de aandrukkracht van de elektroden;
- de tijdsduur van het aandrukken en van de stroomdoorgang;
- de grootte en het verloop van de stroomsterkte.

Door de ruime instelmogelijkheden is puntlassen geschikt voor veel verschillende metalen en werkstukvormen. Er is slechts een korte cyclustijd nodig voor het maken van een las (minder dan een seconde). Het is zowel geschikt voor fabricage in kleine series (zie voor een voorbeeld figuur 9.4) als

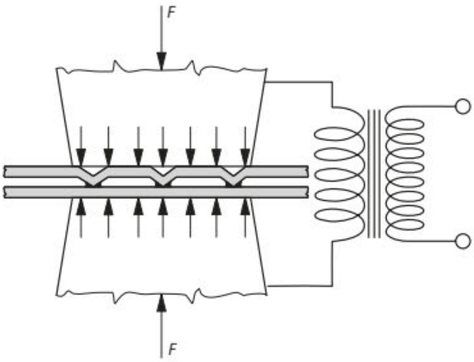


a b c

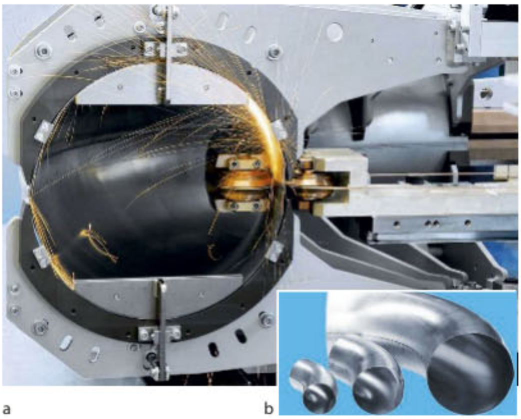
Figuur 9.4 De luchthapper van een vliegtuig (a), puntlasdetail (b) en lasnaad in de lengte getrokken door middel van TIG-lassen (c)

voor grootseriefabricage. Puntlassen wordt bijvoorbeeld toegepast bij de vervaardiging van autocarrosserieën en huishoudelijke apparaten. Bovendien leent het zich goed voor automatisering.

Bij puntlassen ontstaan puntverbindingen. Daarbij kunnen spanningsconcentraties ontstaan. Bovendien kan op plaatsen tussen de puntlassen



Figuur 9.5 Projectielassen



a b

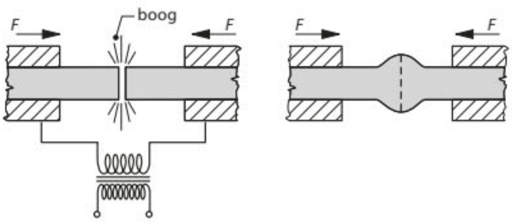
Figuur 9.6 Rolnaadlassen van ronde gebogen pijpen (a) en productvoorbeelden (b) (Soutec AG)

gas of vloeistof binnendringen, waardoor corrosie of lekkage kan ontstaan. Daarom dient men de puntlassen voldoende dicht bij elkaar te plaatsen.

Bij **projectielassen** is een van de onderdelen zo gevormd dat er een gewenst patroon van contactpunten ontstaat (zie figuur 9.5). In één lascyclus ontstaan tegelijkertijd meerdere puntlassen, met behulp van kunstmatig aangebrachte projecties of natuurlijke projecties. Natuurlijke projecties gebruikt men soms vanwege de geometrie van de werkstukdelen, bijvoorbeeld bij wapeningsnetten voor beton of draadnetten in winkelkarretjes. Er zullen dan lassen ontstaan op de contactpunten tussen de loodrecht kruisende staven of draden.

Bij **rolnaadlassen** rollen schijfvormige elektroden over het werkstuk (zie figuur 9.6). Hierdoor ontstaat een lijnverbinding die goed vloeistof- en gasdicht is. Deze methode wordt gebruikt voor de fabricage van vaten uit plaatmateriaal tot circa 4 mm dik. Men gebruikt rolnaadlassen bij de productie van radiatoren voor centrale verwarming, ronde gebogen pijpen, kuipen van wasmachines en brandstoftanks.

Bij **weerstandstomplassen** wordt de geometrie van de las bepaald door de vorm van de te verbinden delen. De delen worden krachtig op elkaar gedrukt door klembekken, die ook dienen voor geleiding van de elektrische stroom (zie figuur 9.7). Dit principe wordt vaak toegepast om staven materiaal met verschillende eigenschappen aan elkaar te verbinden. Denk hierbij bijvoorbeeld aan een spiraalboor. Slechts het snijdende gedeelte moet hierbij uit duur snelstaal (circa € 25/kg) bestaan. De schacht kan veel beter gemaakt worden uit een taaiere en goedkopere staalsoort (circa € 1,50/kg). Ook onderdelen met sterk verschillende doorsneden , kunnen op deze wijze verbonden worden, bijvoorbeeld een klep met een grote diameter en een steel met een kleine



Figuur 9.7 Weerstandstomplassen

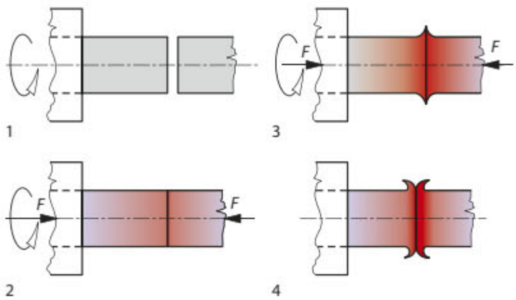
diameter. Een combinatie van beide voorbeelden komt voor bij de kleppen van verbrandingsmotoren: een dunne steel van een taai materiaal wordt hierbij aan een vlakke schijf van hittebestendig materiaal gelast. Nog een typische toepassing is te vinden in het lassen van kettingschakels, van zeer kleine kettingen tot zware ankerkettingen.

Wrijvingslassen

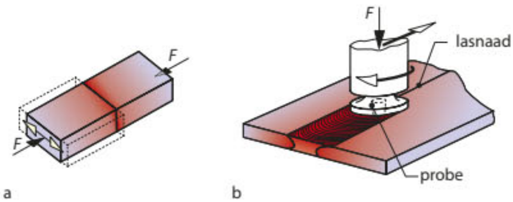
Bij de bekendste vorm van **wrijvingslassen** wordt de benodigde warmte opgewekt door de onderdelen onder enige druk snel langs elkaar te bewegen. Het eenvoudigst is dit te bereiken door een rotatie. Eén onderdeel draait rond; het andere onderdeel staat stil of draait in tegengestelde richting (zie figuur 9.8). Wanneer de temperatuur hoog genoeg is opgelopen, stopt de beweging en lassen de onderdelen onder druk aan elkaar. Met dit proces kunnen materialen met sterk verschillende smeltpunten aan elkaar gelast worden. De doorsnede van de te lassen vlakken moet natuurlijk rotatiesymmetrisch zijn.

Wrijvingslassen kan ook lineair uitgevoerd worden. Dan wordt een van de werkstukdelen stationair ingeklemd en wordt het andere werkstukdeel lineair heen en weer bewogen onder axiale druk (zie figuur 9.9a). Daarnaast wordt **wrijvingsroerlassen** (*friction stir welding*) veel gebruikt (zie figuur 9.9b).

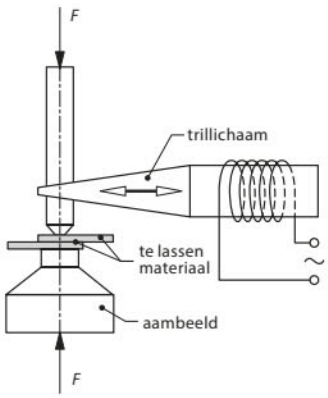
Er bestaan ook nog enkele nichetoepassingen, waaronder *friction taper plug welding*. Deze methode wordt gebruikt in de reparatietechniek. Inserts worden hierbij in scheuren gelast. Dit vindt plaats via rotatiewrijvingslassen, wrijvings-puntlassen of *friction element welding*. Bij friction element welding wordt een soort van rivet via wrijvingslassen gebruikt om overlappende platen te verbinden. Het is daarbij mogelijk om niet-geleidende materialen tegen geleidende materialen te lassen.



Figuur 9.8 Wrijvingslassen



Figuur 9.9 Lineair wrijvingslassen (a) en rotatie-wrijvingsroerlassen (b)



Figuur 9.10 Ultrasoon lassen

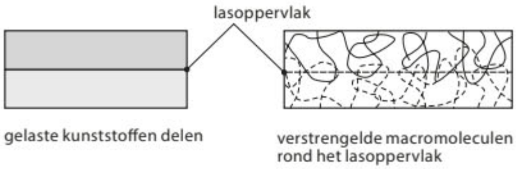
Ook **ultrasoon lassen** is een vorm van wrijvingslassen. Een van de te verbinden delen wordt hierbij in ultrasone trilling gebracht (25-50 kHz), met de bewegingsrichting parallel aan het te verbinden vlak. Vervolgens wordt dit deel op het andere onderdeel gedrukt (zie figuur 9.10). Door de trilling worden oxidelagen en verontreinigingen verbroken en ontstaat er een zeer intensief contact tussen de beide onderdelen. De materialen lassen soms al aan elkaar bij een temperatuur lager dan een derde van de smelttemperatuur op de schaal van Kelvin.

9.3.2 Druklassen van kunststoffen

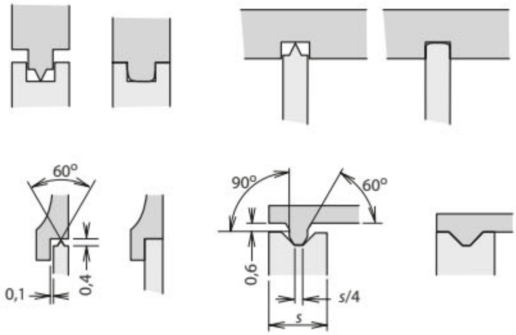
Alleen thermoplastische kunststoffen kunnen worden gelast, en dan nog uitsluitend door middel van een druklasproces. De lasvlakken van de te verbinden onderdelen worden verwarmd tot deze week genoeg zijn. De macromoleculen in de overgangszone verstrengelen zich onder invloed van een drukkracht, waardoor in de lasvlakken een doorlopende homogene structuur ontstaat (zie figuur 9.11). Na afkoeling ontstaat een vrij sterke, niet-demonteerbare verbinding. In principe kan er ook met toevoegmateriaal gelast worden. Dit moet dan wel in viskeuze toestand worden gebracht. Thermoharders met een driedimensionale netwerkstructuur en gevulkaniseerde elastomeren met een vernette structuur zijn niet lasbaar.

Bij de diverse lasprocessen vindt het verwarmen van het materiaal op verschillende manieren plaats. Kunststof buizen worden aan elkaar gelast door de kopvlakken te verwarmen met een elektrisch verwarmd metalen gereedschap, waar lasvlakken tegenaan gedrukt worden Dit noemen we **heetelementlassen** of **spiegellassen**. Handmatig lassen met toevoegmateriaal vindt plaats door middel van hete lucht. Wrijvingslassen wordt onder andere gebruikt om flenzen aan kunststof buizen te bevestigen. **Hoogfrequentlassen** wordt bij voorkeur gebruikt bij het verbinden van folies uit zacht PVC of met PVC beklede weefsels, zoals toegepast in de automobielindustrie (binnenbekleding), speelgoed- en sportartikelenindustrie. Het gaat hier om kunststoffen met polaire eigenschappen, dat wil zeggen met elektrische ladingszwaartepunten in de molecuulstructuur. Deze ladingszwaartepunten worden in het materiaal zelf verwarmd door een snel wisselend elektrisch veld.

De mechanische demping is bij nagenoeg alle kunststoffen groot. Daardoor kan energiedissipatie plaatsvinden. Ultrasoon lassen is daarom een zeer geschikte verbindingstechniek voor thermoplasten. Het wordt niet alleen voor het verbinden van folies gebruikt, maar ook voor de fabricage van discrete producten die in grote(re) series worden vervaardigd (bijvoorbeeld speelgoed en markeerstiften). Het assemblageproces is hierbij vaak geautomatiseerd. Om de trillingsenergie zo goed mogelijk te gebruiken, moet het contactoppervlak klein worden gehouden. Bij harde kunststoffen wordt een van de lasvlakken van een scherpe ril voorzien. Deze ril noemen we ook wel een ‘energierichtinggever’. Hij



Figuur 9.11 Verstrengeling van macromoleculen bij het lassen van thermoplasten



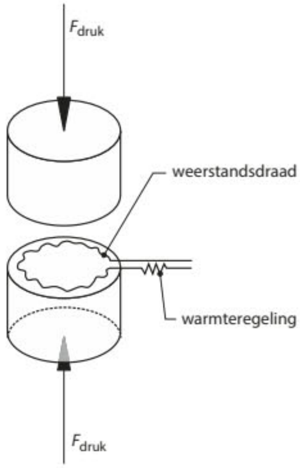
Figuur 9.12 Lasnaadvormen bij ultrasoon lassen van kunststoffen

concentreert de energiestroom. In figuur 9.12 zie je een aantal voorbeelden van lasnaadvormen. Het onderdeel met de ril wordt doorgaans als één werkstuk in een spuitgietmatrijs vervaardigd.

Bij **weerstandlassen** (electro-moflassen) genereert men de benodigde warmte door gedurende een empirisch bepaalde tijd een elektrische stroom te laten lopen door een weerstandsdraad. Deze weerstandsdraad is op een van de te verbinden oppervlakken bevestigd (zie figuur 9.13). Tijdens de stroomdoorgang en de afkoeling erna worden de te verbinden onderdelen op elkaar gedrukt. Een gedeelte van de draad blijft in de verbinding achter en de rest wordt afgeknipt. Deze techniek is vooral geschikt voor het lassen van grote onderdelen met een vrij complexe vorm in kleine series. Deze onderdelen kunnen moeilijk op andere wijze gelast worden.

9.3.3 Booglassen

Bij **booglassen** komt het smelten tot stand onder invloed van een elektrische vlamboog. In de meeste gevallen wordt de boog gevormd tussen een elektrode en het metalen werkstuk. Er bestaan ook booglasprocessen met **niet-afsmeltende** of **permanente elektroden**. De elektrode mag niet smelten of op andere wijze worden aangetast door de boog.



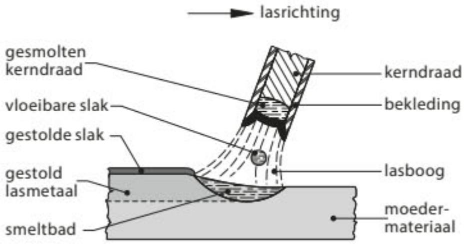
Figuur 9.13 Weerstandlassen van kunststof onderdelen

Permanente elektroden worden dan ook vervaardigd van wolfram. Er kan worden gewerkt met of zonder toevoegmateriaal. Andere booglasprocessen zijn gebaseerd op het gebruik van **afsmeltende elektroden**. Deze leveren meteen het toevoegmateriaal dat de lasnaad moet vullen.
In beide gevallen moet het **smeltbad** worden beschermd tegen oxidatie. Dat kan men doen door het toepassen van een neutraal of reducerend gas, of door het gebruik van een vaste stof, meestal in de vorm van een poeder. Dit poeder smelt bij hoge temperatuur en vormt zo een beschermlaag die het smeltbad afdekt, de **slak**. Meteen na het lassen stolt de slak. Hij vormt een beschermende laag op de nog hete, stollende **lasrups**.

Er worden dus verschillende typen elektroden gebruikt bij het lassen, en het smeltbad en de lasrups worden op verschillende manieren beschermd. Aan de hand daarvan kunnen we de booglasprocessen verder onderverdelen in booglassen met beklede elektrode, MIG-lassen en MAG-lassen, onder poeder lassen en TIG-lassen.

Beklede elektrode

Booglassen met **beklede elektrode** is gebaseerd op het gebruik van een afsmeltende elektrode. Deze afsmeltende elektrode bestaat uit een metalen **kerndraad** en een **bekleding** (zie figuur 9.14). De kerndraad is meestal van ongelegeerd staal, maar heeft soms ook de uiteindelijk gewenste samenstelling. Hij heeft een lengte van 300 tot 500 mm en een dikte tussen 1,5 en 8 mm.



Figuur 9.14 Booglassen met beklede elektrode

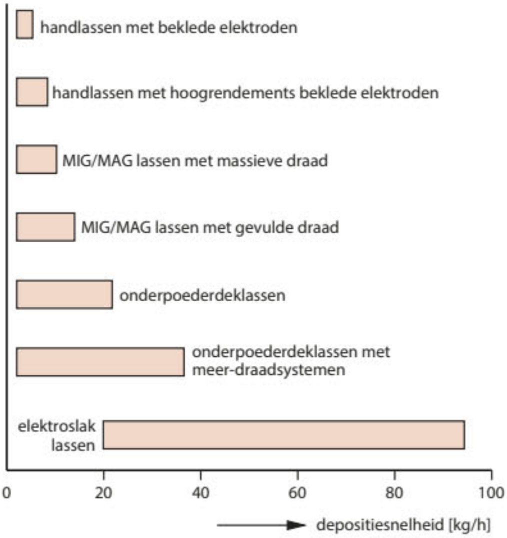
De belangrijkste functies van de bekleding zijn:
- het richten van de boog en van de afgesmolten druppels op het smeltbad. Het is daarom wenselijk dat de bekleding kelkvormig afsmelt;
- het beschermen van de afgesmolten druppels en het smeltbad door het vormen van slak en gas (bijvoorbeeld CO);
- het stabiliseren van de boog door het vormen van gassen die het elektrisch geleidingsvermogen van de boog verhogen;
- het beïnvloeden van het stolgedrag, oftewel het beïnvloeden van de dunvloeibaarheid van het smeltbad, de stolsnelheid en de afkoelsnelheid;
- het toevoeren van bestanddelen die de kwaliteit van de las verbeteren, onder andere legeringselementen;
- het verhogen van het **neersmeltrendement**. Wanneer men in de bekleding van de elektrode metaalpoeder opneemt, is het totaal neergesmolten volume metaal groter dan het afgesmolten volume van de metalen kerndraad van de laselektrode.

Er bestaan veel verschillende typen elektroden. Belangrijke variabelen zijn het materiaal, de diameter van de metalen kerndraad en de eigenschappen van de bekleding. Door de keuze van de elektrodebekleding kan het lasproces worden aangepast aan zeer uiteenlopende situaties.

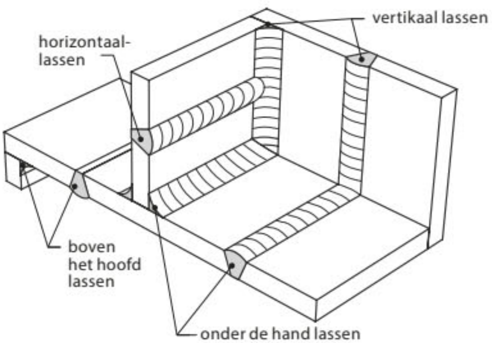
Men gebruikt wisselstroom of gelijkstroom. Dit is afhankelijk van de te maken verbinding, en vooral van het type elektrode. Bij het gebruik van gelijkstroom kan de elektrode zowel verbonden worden met de positieve als met de negatieve pool van de stroombron. De boogspanning bedraagt meestal 10 à 50 V. De toegepaste stroomsterkte wordt bepaald door de doorsnede van de kerndraad in de elektrode en kan variëren tussen 25 en 250 A. Het neersmeltrendement (kg/h) ligt meestal tussen



Figuur 9.15 Opbouw van een dikkere lasnaad



Figuur 9.16 Depositiesnelheden van verschillende lasmethoden



Figuur 9.17 Lasposities

0,5 en 4 kg/h. De doorsnede van de lasnaad die in één keer gelegd kan worden varieert tussen 5 en 30 mm². De haalbare lassnelheid ligt tussen 0,2 en 4 mm/s. Bij grote doorsneden moet een lasnaad door het opbrengen van een aantal opeenvolgende lagen worden gevuld (zie figuur 9.15).

Figuur 9.16 geeft een overzicht van haalbare depositiesnelheden (kg/h) voor het lassen met beklede elektrodes en situeert deze ook ten opzichte van andere lastechnieken, die we hierna beschrijven.

Booglassen met beklede elektrode is de oudste en nog steeds de meest toegepaste variant van het booglassen. Het is een zeer breed toepasbaar proces door de grote keuze aan elektrodematerialen, de relatief geringe investeringen en de grote vrijheid in de positie van de lasnaad. Het best is een lasnaad in horizontale positie ('onder de hand', zoals te zien in figuur 9.17), maar ook andere **laspositities** zijn mogelijk. Zelfs 'boven het hoofd' lassen is uitvoerbaar.

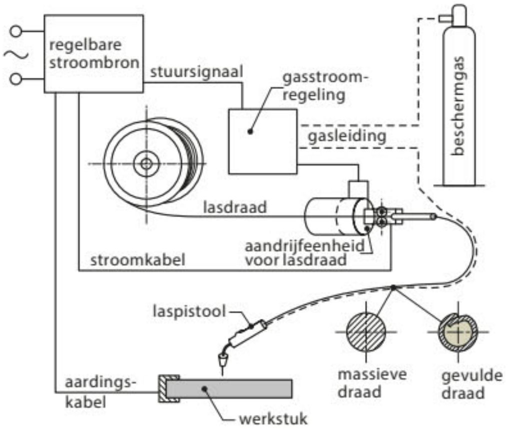
Automatisering van het booglassen met staafelektroden is slechts beperkt mogelijk, omdat de elektroden met korte tussenpozen de elektroden moeten worden gewisseld. Bovendien is er bij alle lasverbindingen nog een groot aantal andere handelingen te verrichten. Denk bijvoorbeeld aan het nauwkeurig positioneren van de aan elkaar te lassen onderdelen, het met een aantal kleine lassen voorlopig aan elkaar hechten van die onderdelen en het verwijderen van de gestolde slak.

MIG-lassen en MAG-lassen

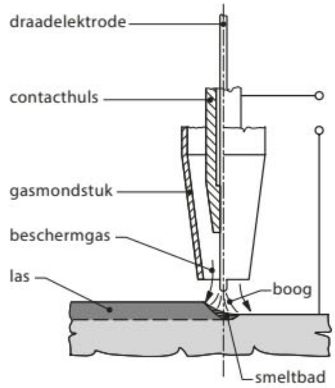
Bij het booglassen met **draadelektrode** is de betrekkelijk korte staafelektrode vervangen door een lange draad op een haspel (zie figuur 9.18). Deze draad wordt mechanisch aangevoerd met een instelbare snelheid. De stroomoverdracht tussen de elektrode en de stroombron komt tot stand bij de **contacthuls** in de **lastoorts** (zie figuur 9.19). Via het gasmondstuk van de lastoorts wordt rondom de elektrode **beschermgas** aangevoerd.

Deze lasmethode kent drie varianten, waarbij het soort beschermgas verschilt:
- **MIG-lassen** *(Metal Inert Gas)*; het beschermgas is een inert gas. Meestal argon, soms helium of een mengsel van deze gassen.
- **MAG-lassen** *(Metal Active Gas)*; het beschermgas is een mengsel van een inert gas met kleine hoeveelheden zuurstof of CO_2. De term *'active'* geeft aan dat het beschermgas op een bepaalde manier reageert met het lasmetaal.
- **CO_2-lassen**; dit is een vorm van MAG-lassen. Het beschermgas bestaat uitsluitend uit CO_2.

Booglassen met draadelektrode is gemakkelijk te automatiseren en leent zich dus goed voor het leggen van lange lasnaden of van lasnaden met een



Figuur 9.18 Installatie voor het booglassen met draadelektrode



Figuur 9.19 MIG-lassen/MAG-lassen

grote doorsnede, die in meerdere lagen moeten worden gevuld. De draad kan massief of gevuld zijn. Lassen met **gevulde draad** zie je in figuur 9.18. De draad is gevuld met een poeder dat deels dezelfde functies kan vervullen als de bekleding bij de staafelektroden. Hij kan ook zijn gevuld met metaalpoeder, in dat geval wordt vooral het neersmeltrendement verhoogd. Meestal gebruikt men in combinatie met een gevulde draad een beschermgas.

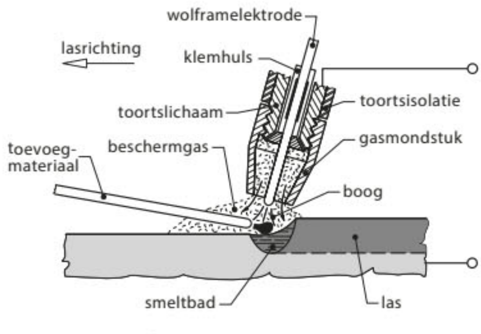
MIG-lassen wordt overwegend voor non-ferrometalen en (hoog)gelegeerde staalsoorten toegepast en MAG-lassen voor het lassen van constructiestaal. CO_2-lassen wordt gekozen wanneer hoge lassnelheden en dus grote stroomsterkten vereist zijn.

Onder poeder lassen

Bij **onder poeder lassen (OP-lassen)** wordt een lasdraad zonder beschermgas gebruikt. Bescherming wordt verkregen door een flux (een poeder), dat uit een toevoeropening rondom de lastoorts stroomt. Dit proces is alleen toe te passen bij lasnaden gelegen in een horizontaal vlak of voor staande hoeklassen. Deze methode wordt toegepast met hoge stroomsterkten (tot wel 2000 A) voor het lassen van dikke platen. Deze platen worden onder andere gebruikt in scheepsconstructies, stoomketels en chemische apparaten. Een andere toepassing van onder poeder lassen is het **oplassen** van een metaal. Er wordt dan een harde, slijtvaste of corrosiebestendige laag opgebracht om de onderliggende vlakken te beschermen, of om een afgesleten oppervlak te repareren (zie ook paragraaf 10.4.5).
OP-lassen kan ook uitgevoerd worden met gevulde draden, met meerdere draden (*twin-arc*), met meerdere laskoppen (*tandem-arc*) of een combinatie hiervan. Al deze varianten vergroten vooral de neersmeltrendementen van het proces. Dit is economisch gezien gunstig.

TIG-lassen

Bij **TIG-lassen** *(Tungsten Inert Gas)* is de niet-afsmeltende elektrode vervaardigd uit wolfram. De bescherming van het lasbad vindt plaats met behulp van een inert gas. Bij dun materiaal is vaak geen toevoegmateriaal vereist. Zo nodig kan men toevoegmateriaal aanvoeren in de vorm van een afzonderlijk staaf of draad. In figuur 9.20 zie je het principe. Vrijwel alle metalen zijn met deze methode te lassen, maar het proces is vooral geschikt voor het lassen van kleine onderdelen uit plaatmateriaal van aluminium (zie figuur 9.4c) en corrosievast staal tot circa 6 mm dikte. Enkelzijdige doorlassing is in één lasproces mogelijk tot maximaal 3 mm dikte. Vanaf 3 mm is er sprake van een overgangsgebied.



Figuur 9.20 TIG-lassen

TIG-lassen is dan nog steeds mogelijk, maar andere processen (waaronder MIG-lassen) zijn technisch en economisch wellicht interessanter.

Een variant op TIG-lassen is het **plasmalassen**. De plasmalastoorts heeft binnen het kanaal voor het beschermgas nog een kanaal, waardoor het **plasmagas** wordt aangevoerd. Dit plasmagas wordt door de vlamboog geïoniseerd en in plasma omgezet. Dit plasma heeft een zeer hoge temperatuur (circa 25000 °C), en levert daardoor een warmtebron met een energiedichtheid die veel hoger is dan bij TIG-lassen. Met plasmalassen kunnen daardoor enkelzijdige doorlassingen worden gemaakt die meer dan twee keer zo dik zijn dan de doorlassingen bij TIG-lassen. Bovendien is de plasmaboog zeer stabiel en kan deze in stand blijven bij zeer lage stroomsterkten. De variant microplasmalassen is daardoor te gebruiken bij zeer kleine materiaaldikten, tot circa 0,1 mm.

9.3.4 Autogeen lassen

Bij **autogeen lassen** wordt de warmte geleverd door verbranding van een mengsel van een verbrandingsgas en zuurstof. Acetyleen (C_2H_2) is het meest gebruikelijke verbrandingsgas, maar propaan komt bijvoorbeeld ook voor. De gassen worden gemengd in een lasbrander. De keuze van het verbrandingsgas wordt mede bepaald door de gewenste vlamtemperatuur. De verbrandingsgassen kunnen tevens dienen als beschermgas. Door de instelling van de mengverhouding tussen het verbrandingsgas en de zuurstof kan het proces worden aangepast aan de omstandigheden.

Het toevoegmateriaal wordt aangevoerd als een afzonderlijke staaf, net als bij manueel TIG-lassen. Door de keuze van de brander en de positie ervan ten opzichte van het werkstuk is het mogelijk autogeen lassen toe te passen voor dunne materialen (bijvoorbeeld bij de reparatie van autocarrosserieën) en voor grotere plaatdikten. Boven een dikte van 5 mm is het nodig de plaatranden af te schuinen. Voor autogeen lassen is geen elektrische energiebron nodig. Dat is vooral een voordeel als de laswerkzaamheden op een buitenlocatie moeten worden uitgevoerd. Autogeen lassen is een zeer traag proces, de vlamtemperaturen en de energie-dichtheid liggen lager dan bij de booglasprocessen. Economisch gezien is het daardoor niet zo interessant. Daarnaast wordt hierdoor zeer veel warmte in de werkstukken ingebracht. Dit is funest voor de optredende krimp en vervorming na het lassen.

9.3.5 Temperatuureffecten

Bij lassen wordt het werkstukmateriaal tijdelijk tot smelten gebracht. Dit heeft een belangrijke invloed op het gedrag van het werkstuk en op de eigenschappen van het werkstukmateriaal. In een aantal gevallen kan deze invloed ernstige gevolgen hebben. We kijken in deze paragraaf specifiek naar krimp en structuurveranderingen.

Krimp

In hoofdstuk 3 hebben we reeds behandeld dat vloeibare metalen tijdens het stollen slinken en vervolgens in vaste toestand krimp vertonen. Dit laatste leidt bij het lassen tot **krimpspanningen**. Krimpspanningen ontstaan in de eerste plaats als de lasnaad en de omgeving daarvan niet gelijktijdig opwarmen en afkoelen. De spanningen kunnen leiden tot vormveranderingen van het product. Dit betekent dat de maatnauwkeurigheid bij gelaste constructies problemen kan opleveren. Bovendien kunnen de krimpspanningen de toelaatbare gebruiksbelastingen verlagen en zelfs scheurvorming veroorzaken.

Krimpspanningen zijn niet te vermijden, maar het is wel mogelijk ze aanzienlijk te beperken. Dit kan onder meer op de volgende manieren:
- span tijdens het lassen de onderdelen zo in dat de las en zijn omgeving vrij kunnen krimpen. Het productontwerp en de volgorde waarin de lasverbindingen worden gemaakt bepalen mede in hoeverre dit mogelijk is;
- vermijd elkaar kruisende lasnaden door het toepassen van T-kruisingen;
- pas na het lassen **spanningsarm gloeien** toe. Hierbij dalen de inwendige spanningen door plastische vervormingen. Deze treden op door het werkstuk enige tijd op hogere temperatuur te laten verblijven. Voor het bereiken van een goede maatnauwkeurigheid moet het verspanend nabewerken van gelaste constructies dus altijd na het gloeien plaatsvinden.

Structuurveranderingen

De cyclus opwarmen-smelten-stollen-afkoelen heeft een belangrijke invloed op de structuur van het

Lasprocessen	Werkstukmateriaal			
	constructie-staal	austenitisch staal	Al	Cu
Weerstandlassen	x		x	
Booglassen met beklede elektrode	x	x		
MIG-lassen		x	x	x
MAG-lassen	x		–	–
Onder poederlassen	x^2	x^2	–	–
TIG-lassen	x^1	x^1	x	x
Autogeenlassen	x^1	–		
Elektronenstraal lassen	x^1	x^1		
Laserlassen	x^1	x^1	–	

x goed toepasbaar 1) geldt voor dunne platen (ca. 1-5 mm)
– niet toepasbaar 2) geldt voor dikkere platen (dikte > 5 mm)

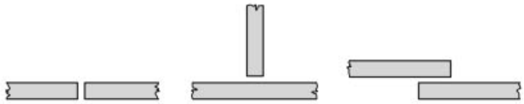
Figuur 9.21 Geschiktheid van lasmethoden voor enkele materiaalgroepen

materiaal in de las en op het materiaal in de omgeving van de las. De keuze van de lasmethode bij een gegeven werkstukmateriaal speelt dus een belangrijke rol. In figuur 9.21 geven we een overzicht van geschikte combinaties.

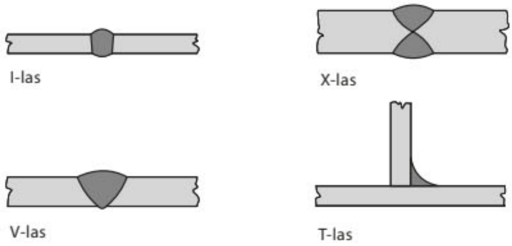
De structuur van het materiaal in en rondom de las zal in zekere mate afwijken van die in het overige materiaal. Dit is afhankelijk van het werkstukmateriaal, het lasproces en de gekozen lasparameters (zoals de lassnelheid en de stroomsterkte). De grootste problemen treden op bij het lassen van staal. Wanneer het afkoelen van staal te snel verloopt, ontstaat een zeer harde, brosse structuur (martensiet). Een sterk geconcentreerde warmtetoevoer en een grote plaatdikte verhogen de afkoelsnelheid. De maximaal toelaatbare afkoelsnelheid neemt af naarmate het gehalte aan koolstof en legeringselementen toeneemt. Door voorverwarmen is het mogelijk de afkoelsnelheid te verminderen.

9.3.6 Vormgeving van lasverbindingen

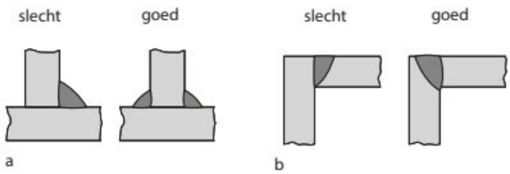
In figuur 9.22 zie je enkele mogelijke standen van te verbinden plaatdelen. De verbindingen kunnen worden gerealiseerd met verschillende vormen van lasnaden, afhankelijk van de plaatdikte. Figuur 9.23 laat een aantal verschillende lasnaden zien (zie ook EN ISO 9692-1:2013, *Welding and allied processes, types of joint preparation*). De vormgeving van de lasverbinding bepaalt in grote mate de



Figuur 9.22 Mogelijke standen van plaatwerkonderdelen



Figuur 9.23 Uitvoeringsvormen van lasnaden



Figuur 9.24 T-las (a) en hoeklas (b)

sterkte, de krimpspanningen en de gevoeligheid voor scheuren. Met de vormgeving van de lasnaad kunnen de eigenschappen van de verbinding beïnvloed worden. Door het toepassen van een dubbelzijdige lasnaad is de belasting verdeeld en kunnen de naad en de warmtebeïnvloede zone verkleind worden (zie figuur 9.24a). Door de smeltlijn van de lasnaad niet in het verlengde van het plaatoppervlak te plaatsen maar onder een hoek, wordt de kans op lengtescheuren verminderd (zie figuur 9.24b). In figuur 16.14 geven we een aantal aanwijzingen voor de vormgeving van gelaste constructies.

9.3.7 Kwaliteitsbeheersing bij het lassen

Om bij kritische lasverbindingen de kwaliteit te garanderen, moeten de volgende beproevingen worden uitgevoerd:

- Er moeten proefstukken worden gelast onder dezelfde omstandigheden, en soms ook door dezelfde lasser, als tijdens de uitvoering van de werkelijke las. Uit deze proefstukken worden proefstaven genomen voor het destructief

bepalen van de mechanische eigenschappen van het gelaste materiaal.
- De gelaste werkstukken moeten worden onderzocht met verschillende niet-destructieve methoden. Visueel onderzoek (EN ISO 17637:2016) is hierbij het belangrijkst, maar het kan bijvoorbeeld ook gaan om röntgenonderzoek. Deze methoden komen aan de orde in hoofdstuk 12.

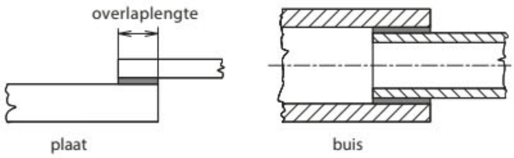
De belangrijkste voorwaarde voor het bereiken van een hoog kwaliteitsniveau is het vakmanschap van de lassers. Constructies als drukvaten en staalconstructies hebben een groot veiligheidsrisico. Om werkzaamheden aan deze constructies te mogen verrichten, moeten lassers over een speciale geldige **laskwalificatie** beschikken. Ze moeten hun bekwaamheid bovendien periodiek aantonen, volgens de regels die daarvoor gelden.

9.4 Grondbeginselen van solderen en lijmen

Lijmen en solderen komen in principe sterk overeen. In beide gevallen is er sprake van verbinden met behulp van een **tussenlaag**. Lijmen en solderen zijn vlakverbindingen. Bij lijmen bestaat de tussenlaag uit organisch materiaal, bij solderen uit een metaallegering. De mechanische sterkte van de tussenlaag is lager dan die van de te verbinden materialen, bij lijmen meestal zelfs veel lager. Dit betekent dat het oppervlak van een soldeer- of lijmverbinding betrekkelijk groot moet zijn. Deze verbindingen zijn daarom bijna altijd uitgevoerd als een **lapnaad** (zie figuur 9.25). De verbindingslaag wordt daardoor op afschuiving belast. Op deze wijze is een voldoende groot oppervlak beschikbaar om de belasting over te dragen.
Het gebrek aan verzwakking en spanningspieken is gunstig voor de weerstand tegen vermoeiing.

Lijm- en soldeerverbindingen zijn te beschouwen als een ketting met vijf schakels:
- het materiaal van onderdeel A;
- de verbinding van de tussenlaag met materiaal A;
- de tussenlaag;
- de verbinding van de tussenlaag met materiaal B;
- het materiaal van onderdeel B.

Uiteraard is de zwakste schakel bepalend voor de sterkte van de verbinding. De sterkte van de verbinding van de tussenlaag met het onderdeel



Figuur 9.25 Lapnaad

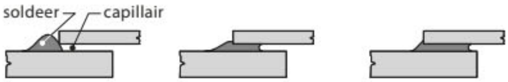
wordt gerealiseerd via **adhesie** (ook wel hechting genoemd), de sterkte van de tussenlaag zelf heet de **cohesie**. Adhesie en cohesie zijn verschillende verschijnselen, die we nog apart zullen bekijken.

Bij een vergelijking tussen lijmen/solderen en lassen komen de volgende punten naar voren:
- bij lijmen/solderen veranderen de materiaaleigenschappen meestal niet;
- met lijmen/solderen zijn materialen te verbinden die niet of slecht lasbaar zijn;
- lijmen en solderen bieden meer mogelijkheden dan lassen om verschillende materialen te verbinden;
- bij lijmen/solderen zijn inwendige spanningen ten gevolge van krimp veel lager dan bij lassen, of ze ontbreken geheel;
- lijmen/solderen vraagt om grotere verbindingsvlakken dan lassen.

Lijmen en solderen kunnen ook worden vergeleken met pen-gatverbindingen en met puntlassen:
- bij een goede hechting kan er geen vocht en vuil tussen de verbonden vlakken dringen, waardoor de kans op corrosie veel kleiner is dan bij pengatverbindingen en puntlassen.
- bij lijmen/solderen treedt geen verzwakking op door bout- of nagelgaten;
- bij lijmen/solderen treden geen spanningspieken op.

De uitvoering van soldeer- en lijmprocessen stelt vaak bijzondere eisen, waardoor de kosten betrekkelijk hoog kunnen zijn:
- om een goede adhesiesterkte te bereiken, is in veel gevallen een oppervlaktebehandeling van de te verbinden vlakken nodig (reiniging, soms gevolgd door een wijze van activering);
- bij het uitharden van lijmverbindingen moet druk worden uitgeoefend op de lijmvlakken.

Er bestaan ook belangrijke verschillen tussen lijmen en solderen:



Figuur 9.26 Capillaire werking

- Bij solderen treden (vaak veel) hogere temperaturen op dan bij lijmen. De verbinding zelf is ook bestand tegen hogere temperaturen.
- Bij solderen vult de spleet tussen de onderdelen zich met vloeibaar soldeer door **capillaire werking** (zie figuur 9.26). De spleetbreedte moet daarvoor nauwkeurig worden bepaald. Bij lijmen wordt de tussenlaag aangebracht voordat de onderdelen worden samengevoegd.
- De wijze van hechting tussen de soldeerlaag en het onderdeel (door de vorming van mengkristallen) verschilt wezenlijk van de wijze van hechting tussen de lijmlaag en het onderdeel (aantrekkingskracht tussen verschillende atomen).

De besproken verbindingsmethoden kunnen elkaar niet zonder meer vervangen. Het vervangen van lassen door lijmen vereist bijvoorbeeld vaak een principieel andere opzet van het ontwerp. Dit kan leiden tot een andere vormgeving en andere afmetingen.

9.5 Solderen

Solderen wordt toegepast indien het smelten van de oppervlakken van de te verbinden onderdelen ongewenst is. Het gesmolten soldeer legeert het materiaal aan het oppervlak van de te verbinden delen. Zelf behouden die delen hun vaste toestand. De verbinding komt vervolgens tot stand door het stollen van het soldeer.
We bespreken in deze paragraaf soldeermaterialen, het gebruik van vloeimiddel en verhitting.

Soldeermaterialen

Bij het solderen is het smeltpunt van het soldeer van groot belang. Dit moet in elk geval lager zijn dan het laagste smeltpunt van de te verbinden materialen. Soldeerlegeringen met een smeltpunt lager dan 450 °C worden vanwege de lage hardheid **zachtsoldeer** genoemd. Soldeerlegeringen met een smeltpunt hoger dan 450 °C worden vanwege de hogere hardheid aangeduid met **hardsoldeer**. Bij het gebruik van zachtsoldeer is het risico van thermische beschadiging van de onderdelen uiteraard kleiner. Met hardsoldeer worden echter sterkere verbindingen verkregen. De bekendste soldeerlegering is de lood-tinlegering. Deze legering wordt gebruikt voor het solderen van elektrische verbindingen en koperen leidingen. Veel fietsframes worden gesoldeerd met koper-zilverlegeringen met smeltpunten van 650 °C tot meer dan 800 °C. Hoe hoger het zilvergehalte, hoe lager het smeltpunt.
De eisen die aan soldeerlegeringen worden gesteld, hangen af van de toepassing. Soms is een dunvloeibaar soldeer met een duidelijk smeltpunt gewenst (een eutectische legering). Dat is het geval als het soldeer door capillaire werking in een nauwe spleet (bijvoorbeeld minder dan 0,1 mm breed) moet doordringen. In andere gevallen is juist een dikvloeibaar soldeer gewenst dat een smelttraject vertoont. Daarmee kunnen bijvoorbeeld soldeervoegen tot enkele tienden mm dik worden gevuld. Het risico dat er scheuren in de soldeernaad ontstaan tijdens het afkoelen is dan wel groot. Het soldeer mag bij de soldeertemperatuur niet ontmengen, geen ongewenste oxidatieproducten vormen en het werkstuk niet aantasten. Het moet de oppervlakken goed bevochtigen.

Soldeer wordt geleverd als draad, staf, pasta of folie. Pasta en folie moeten vóór het solderen op de gewenste plaats worden aangebracht. Figuur 9.27 geeft een overzicht van bij solderen toegepaste combinaties van werkstuk- en soldeermaterialen.

Vloeimiddel

Vóór het solderen wordt een **vloeimiddel** aangebracht, dat onder andere tot doel heeft de oxidelaag te verwijderen, de oppervlaktespanning te verlagen voor een betere bevochtiging en de oppervlakken en het gesmolten soldeer tegen oxidatie te beschermen. Na het maken van de soldeerverbinding moeten dit vloeimiddel en eventuele andere verontreinigingen weer worden verwijderd om nadelige gevolgen te voorkomen. Bij vele staafvormige soldeermaterialen is de metalen toevoegstaaf dikwijls omhuld door een laagje flux, dat bij smelten het vloeimiddel levert.

Verhitting

Soldeer kan op verschillende manieren worden gesmolten. Bij zachtsolderen wordt meestal een **soldeerbout** met een koperen lichaam gebruikt,

Werkstukmateriaal	Zachtsoldeer				Hardsoldeer				
	Cd-Zn	Sn-Pb	Sn-Zn	Sn	Al	Cu-P	Cu-Ag	Cu-Zn	Ag
Al en Al-legeringen	x	x	x		x				
Cu en Cu-legeringen	x	x		x		x	x	x	x
Staal	x	x		x			x	x	x

Figuur 9.27 Geschikte materiaalcombinaties bij het solderen

die tot de vereiste temperatuur verhit wordt. Bij hardsolderen voldoet deze **indirecte verhitting** niet meer. Dan is een **directe verhitting** van de plaats waar de verbinding gemaakt moet worden en van het soldeer noodzakelijk. Men kan kiezen voor verhitten met een vlam, via inductie of eventueel in een (vacuüm)oven. De keuze van de verwarmingsmethode is afhankelijk van de vorm van de te verbinden onderdelen en van de seriegrootte. Problemen met het reinigen en met vloeimiddelen zijn te ondervangen door het solderen zonder vloeimiddel uit te voeren in een oven waarin vacuüm heerst of een inert of reducerend gas aanwezig is. Dit wordt **ovensolderen** genoemd. Op deze wijze ontstaan tal van hoogwaardige verbindingen voor bijvoorbeeld medische apparaten en producten toegepast in de lucht- en ruimtevaart. Honingraatstructuren voor labyrintafdichtingen in straalturbines worden bijvoorbeeld op deze manier gesoldeerd.

9.6 Lijmen

We bespreken in deze paragraaf de basisprincipes van lijmen, beschikbare lijmsoorten, het aanbrengen en uitharden van lijm, en de kwaliteitsbeheersing van het proces.

9.6.1 Basisprincipes

Bij lijmen bestaat de tussenlaag vrijwel altijd uit organisch materiaal. Ook de tegenwoordig zeer veel als lijm gebruikte kunstharsen zijn van organische oorsprong. Zoals we al aankondigden, kijken we apart naar de sterkte van de lijmlaag zelf (cohesie) en de verbinding tussen de lijmlaag en de onderdelen (adhesie).

Cohesie

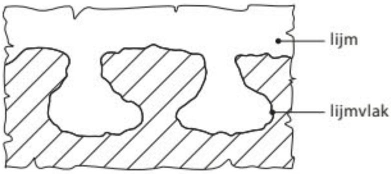
De cohesie van een lijmlaag is niet hetzelfde als de mechanische sterkte van het uitgeharde lijmmateriaal. Uitgeharde lijm is te beschouwen als een zeer viskeuze (stroperige) stof. Het vervormen en uiteindelijk bezwijken van een lijmlaag is in wezen een stromingsverschijnsel. De stroming wordt belemmerd door een hoge viscositeit en door een nauwe spleet. Een lijmverbinding is daarom sterker naarmate de dikte van de lijmlaag kleiner is. Vóór het uitharden moet de lijm dus tot een dunne laag worden uitgeperst. Voorwaarden hiervoor zijn:
- nauwkeurig passende onderdelen;
- dunvloeibare lijm;
- voldoende druk in de lijmnaad.

De cohesiesterkte hangt af van de eigenschappen van de lijm en van de omstandigheden tijdens het uitharden.

Adhesie

Het belangrijkste probleem bij het lijmen is het verkrijgen van een goede adhesie. Het mechanisme dat adhesie teweegbrengt kan sterk verschillen voor verschillende materialen (denk aan hout, kunststoffen, metalen...) Een eerste voorwaarde voor het verkrijgen van hechting is dat het te lijmen oppervlak intensief contact maakt met de lijmvloeistof. Dit noemt men een goede **bevochtiging**. Verontreinigingen, zoals vet, stof en vingerafdrukken, kunnen de bevochtiging belemmeren. Een bekend voorbeeld hiervan is een in de was gezet oppervlak, waarop water grote druppels vormt. De bevochtiging is dan zeer slecht. Voor het verkrijgen van een betrouwbare hechting moeten de delen dus vóór het aanbrengen van de lijm grondig worden gereinigd. Vaak is het ook nodig om het voor hechting beschikbare oppervlak te vergroten. Een veel toegepaste bewerking is het verhogen van de ruwheid door schuren of slijpen van gladde oppervlakken. Ook chemische of elektrochemische behandelingen van metaaloppervlakken kunnen het oppervlak aanzienlijk vergroten.

Adhesie bij poreuze materialen berust voornamelijk op **mechanische verankering** volgens figuur 9.28. De lijm dringt in de poriën en verhardt daar.



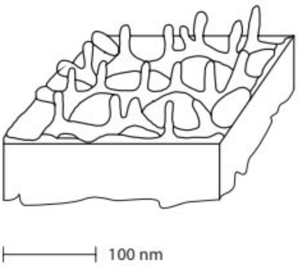
Figuur 9.28 Mechanische verankering van de lijm

Adhesie bij kunststoffen ontstaat door het oplossen en weer stollen van een dunne oppervlaktelaag van beide te verbinden delen.

Adhesie bij metalen berust op de onderlinge aantrekkingskracht van moleculen of atomen door Van der Waalskrachten. Deze krachten ontstaan door een ongelijkmatige elektrische lading van de deeltjes. Dit treedt alleen op wanneer de oppervlakken **polair actief** zijn. Onedele metalen zijn bedekt met een oxidehuid die gewoonlijk niet polair actief is. Het is dus nodig deze huid met een mechanische bewerking (bijvoorbeeld slijpen) of met een chemische behandeling (bijvoorbeeld beitsen) te verwijderen.

Bij het lijmen van aluminium kan de hechting verder verbeterd worden door na het beitsen te **anodiseren**. Dit is een elektrochemisch proces dat wordt toegepast om een oxidelaag met gewenste eigenschappen te verkrijgen. Door de typische structuur van het geanodiseerde oppervlak neemt het hechtingsoppervlak sterk toe (zie figuur 9.29). De anodiseerlaag bevordert bovendien de corrosiebestendigheid. In de vliegtuigbouw is dit een gebruikelijke werkwijze.

Na de voorbehandeling moeten de delen met grote zorg worden gehanteerd. Het is niet toelaatbaar ze met de hand aan te raken. Het is belangrijk de



Figuur 9.29 Oppervlaktestructuur door anodiseren van aluminium (sterk vergroot)

oppervlakken zo snel mogelijk na de behandeling te beschermen, bij voorkeur door het lijmproces meteen uit te voeren of tenminste de lijm aan te brengen.

9.6.2 Beschikbare lijmsoorten

Het aantal verschillende lijmsoorten is zeer groot; de meeste zijn echter organisch van aard.
Lijmsoorten kunnen op basis van diverse criteria worden ingedeeld. In dit boek beperken we ons tot de verschijningsvormen en de wijze van uitharden. Verschijningsvormen van lijm zijn vloeistof, pasta, poeder en vaste stof (blok, staaf of folie). Er bestaan fysisch uithardende lijmsoorten en chemisch uithardende lijmsoorten.

Fysisch uithardende lijmsoorten zijn in het algemeen gemakkelijk te verwerken. De sterkte is echter matig. Er bestaan drie soorten: dispersielijmen, contactlijmen en smeltlijmen. Van dispersielijmen wordt het oplosmiddel (water) door de poreuze onderdelen geabsorbeerd. Het oplosmiddel van contactlijmen verdampt voordat de delen op elkaar worden gedrukt. De smeltlijmen worden door verwarming tijdelijk vloeibaar.

Chemisch uithardende lijmsoorten harden uit door een chemische reactie, meestal polymerisatie. We onderscheiden hierbij thermoplasten en thermoharders. Thermoplasten worden bij verwarming na het polymeriseren weer week, thermoharders niet.

Verder kunnen we onderscheid maken tussen een- en tweecomponentenlijmen. De grens hiertussen is overigens niet geheel duidelijk.
Onder de **eencomponentlijmen** vallen de cyanoacrylaatlijmen, de polyurethaanlijmen en de fenol-/resorcinelijmen. Cyano-acrylaatlijmen zijn de bekende 'secondelijmen'. Polyurethaanlijmen harden uit met behulp van vocht uit de omgeving. Fenol-/resorcinelijmen harden uit onder afscheiding van water.
Onder de **tweecomponentenlijmen** vallen de acrylaatlijmen, de epoxylijmen en de tweecomponenten-polyurethaanlijmen. Bij acrylaatlijmen worden beide componenten elk op een onderdeel aangebracht. De componenten van epoxylijmen zijn vaak in de vorm van een folie voorgemengd. Tweecomponenten-polyurethaanlijmen harden uit zonder vocht uit de atmosfeer.

Fenollijmen en epoxylijmen leveren de meest hoogwaardige verbindingen en worden daarom veel toegepast in de vliegtuigbouw.

9.6.3 Aanbrengen en uitharden van lijm

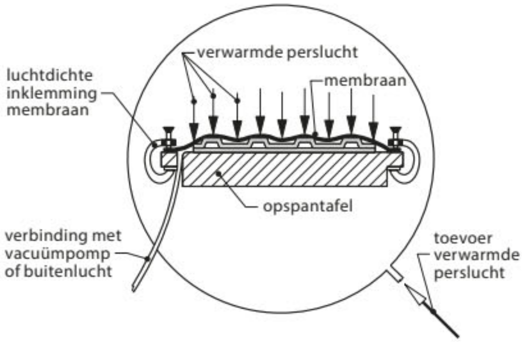
De manier waarop de lijm wordt aangebracht is afhankelijk van:
- de aard van het product;
- de verschijningsvorm van de lijm;
- de eisen op het gebied van kwaliteit en milieu;
- het productaantal.

Voorbeelden van aanbrengtechnieken zijn aanbrengen met de kwast, spuiten door vernevelen met luchtdruk, strijken, gieten en aanbrengen van de lijm in vaste toestand in de vorm van folie.

Bij het uitharden van lijm moeten de juiste condities aanwezig zijn. Denk aan de juiste temperatuur en vochtigheid. Ook moet er lang genoeg een bepaalde druk worden uitgeoefend. Dit is nodig voor:
- het uitpersen van de lijm tot de juiste laagdikte;
- het op elkaar drukken van niet zuiver passende onderdelen;
- het voorkómen van poreusheid van de lijmlaag als gevolg van gas- of dampvorming (dit kan optreden bij fenollijmen).

De juiste condities worden op verschillende manieren verkregen. Vooral de goede aandrukkracht kan op veel verschillende manieren worden bereikt, bijvoorbeeld door klemmen en het gebruiken van gewichten. Wanneer aan zeer hoge eisen voldaan moet worden, kan men een **autoclaaf** gebruiken. Dit is een ketel die met hete lucht op druk wordt gebracht (zie figuur 9.30). Het te lijmen product moet hiervoor luchtdicht in folie worden verpakt. De ruimte binnen de folie wordt verbonden met de buitenlucht of wordt vacuüm gezogen. Zowel het luchtdicht verpakken als het uitharden in de autoclaaf zijn langdurige en dus kostbare processen. Deze methode is daarom niet geschikt voor grote productaantallen. Ze wordt vooral toegepast in de vliegtuigindustrie.

Een groot voordeel van lijmen is dat daarmee zeer verschillende materialen met elkaar verbonden kunnen worden. Door de elasticiteit van de lijm kunnen zelfs verschillen in uitzetting enigszins gecompenseerd worden. Door de vrij grote oppervlakken van



Figuur 9.30 Lijmen in een autoclaaf

lijmverbindingen dragen zij vaak bij aan een hoge sterkte en stijfheid van de constructie. Zo zorgt lijmen bijvoorbeeld voor een gewichtsbesparing bij autoruiten in de carrosserie.

9.6.4 Kwaliteitsbeheersing bij het lijmen

De algemene aspecten van kwaliteitsbeheersing behandelen we in hoofdstuk 12. Hier bespreken we alleen de bijzondere kenmerken van de kwaliteitsbeheersing bij het lijmen.

Bij sommige fabricageprocessen biedt een visuele controle al een zekere indicatie van de kwaliteit. Bij lijmen is kijken (visuele controle) echter maar in beperkte mate zinvol. Het voldoende uitpersen van de lijm zegt iets over de aanwezigheid van de hoeveelheid lijm en over de juiste lijmdruk. Dit garandeert echter niet dat de verbinding ook goed is. De cohesie- en adhesiesterkte moeten bij het beheersen van de lijmkwaliteit afzonderlijk worden beschouwd. Dat doen we hier dan ook.

Cohesie

De cohesiesterkte hangt af van de aard en kwaliteit van het lijmmateriaal, en van de condities tijdens het uitharden. De kwaliteit van het lijmmateriaal wordt voornamelijk bepaald door de opslagcondities en de duur van de opslag. Temperatuur en tijd zijn goed meetbaar, maar de druk minder. Bij het toepassen van klemmen kan het daarom lastig zijn de gewenste druk in te stellen. Een groter probleem is echter dat ook het instellen van de juiste uitwendige druk geen garantie geeft dat de druk in de lijmlaag de gewenste waarde heeft. Dit hangt namelijk onder meer ook af van de passing en de positie van de onderdelen en de gereedschappen.

Wanneer er zeer hoge eisen aan de betrouwbaarheid van lijmverbindingen gesteld worden, is het visueel controleren van proefstukken niet voldoende. Een andere methode om de cohesiesterkte te meten is in deze gevallen onmisbaar. De reactie op geluidstrillingen blijkt een goede indicatie van de cohesiesterkte te geven. Men kan op het materiaaloppervlak kloppen. Het geluid en het stuiteren van het hamertje geven een (zeer subjectieve) indruk van de cohesie. De Fokker Bondtester is een meetapparaat gebaseerd op het ultrasoon meetprincipe (zie paragraaf 12.9). Dit apparaat maakt een objectieve meting van de cohesiesterkte mogelijk.

Adhesie

Er bestaat geen enkele betrouwbare methode om adhesie niet-destructief te controleren. Men kan alleen proberen om de variabelen die de mate van adhesie bepalen te beheersen. Dit zijn:
- de kwaliteit van het lijmmateriaal;
- de voorbehandeling van de te verbinden vlakken;
- de condities na het uitvoeren van de voorbehandeling.

Daarnaast kan men eventueel proefstroken destructief testen.

9.7 Kitten

Kit is een bindmiddel dat in veel dikkere lagen wordt aangebracht dan lijm. De kit kan tamelijk week blijven of zich min of meer verharden. De sterkte is veel lager dan die van de betere lijmsoorten. De functies van kit zijn in de eerste plaats vullen en afdichten. Daarnaast heeft kit ook een verbindende functie, bijvoorbeeld bij het vastzetten van glas in een sponning.

Kitten wordt toegepast als de onderdelen niet nauwkeurig aan elkaar passend kunnen worden gemaakt. Ook materialen met sterk uiteenlopende eigenschappen kunnen door kitten met elkaar worden verbonden. Het is bovendien een geschikt proces als de verbinding niet al te star mag zijn om vervormingen door mechanische of thermische belasting te kunnen weerstaan. Vaak gelden al deze omstandigheden.

9.8 Verbinden met verbindingselementen

We kijken in deze paragraaf om te beginnen naar verbindingselementen in het algemeen. Vervolgens bespreken we verbinden door plastische vervorming en verbinden zonder plastische vervorming.

9.8.1 Verbindingselementen

Er bestaan talloze soorten verbindingselementen. Deze kunnen worden onderverdeeld in productgroepen op basis van het toepassingsgebied en de aard van het verbindingselement. Voorbeelden van verbindingselementen zijn schroeven, zelftappende schroeven, zelfborende en -tappende schroeven, bouten, moeren, houtschroeven, betonbevestigers, ankers, pluggen, draadnagels (spijkers), klinknagels en pijpverbindingselementen. Het assortiment breidt zich voortdurend uit om steeds weer aan nieuwe behoeften te voldoen. Denk aan een snellere montage, hogere duurzaamheid, lagere massa en een fraaier uiterlijk. Het overgrote deel van deze verbindingen zijn **pen-gatverbindingen**. Bij deze verbindingen brengt een in een gat gestoken of gedreven pen de verbinding tot stand. De gunstigste belastingoverdracht vindt plaats bij het belasten van de pen op afschuiving. Toch komt in het bijzonder bij schroefverbindingen ook vaak belasting op trek voor. Voor een goede verbinding moeten de verbindingselementen de onderdelen vaak met grote kracht op elkaar drukken.

Zoals we eerder hebben vermeld, kunnen we bij verbindingselementen onderscheid maken tussen elementen die bij het plaatsen een plastische (blijvende) vervorming ondergaan, zoals klinknagels, en elementen waarbij dat niet het geval is. Oftewel: de elementen zijn beperkt losneembaar, of losneembaar. Verbindingen met verbindingselementen behoren tot de puntverbindingen.

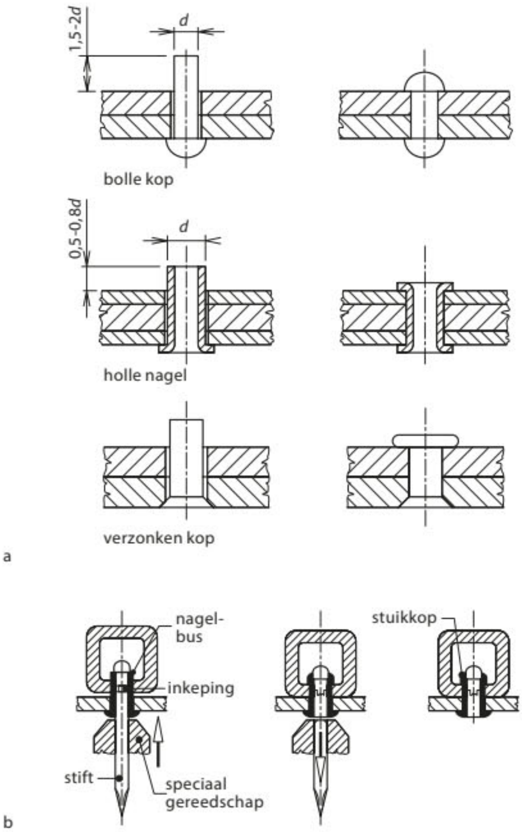
De onderdelen worden in het algemeen door de verbindingselementen tegen elkaar gedrukt. Bij belasting op afschuiving zal daardoor de belasting voor een deel door wrijving worden overgebracht. Bij sterkteberekeningen wordt dit effect overigens vaak buiten beschouwing gelaten.

Niet alleen de kosten van de verbindingselementen zelf en de kosten van het aanbrengen zijn van belang. Ook de kosten van de voorbewerking van de

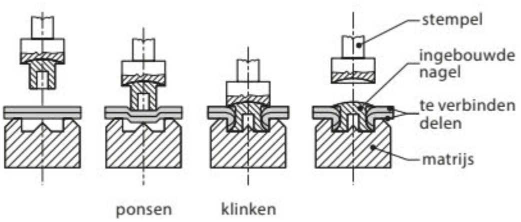
onderdelen, zoals het boren van gaten en het tappen van schroefdraad, mogen bij een kostenvergelijking van verbindingsmethoden niet buiten beschouwing blijven.

9.8.2 Verbinden door plastische vervorming

De belangrijkste verbindingselementen in deze categorie zijn **klinknagels** (zie figuur 9.31a). Deze



Figuur 9.31 Enkele klinkverbindingen (a) en het aanbrengen van een treknagel (b)



Figuur 9.32 Ponsklinken

zijn vrijwel steeds aan een uiteinde voorzien van een voorgevormde kop, de **zetkop**. De blokkering tegen axiale verschuiving en de klemkracht wordt verkregen door plastische vervorming van de pen, het vormen van de **sluitkop**. De diameter van de steel neemt toe, waardoor de speling tussen gat en nagel wordt opgeheven. De omvormkracht wordt bij de standaard **massieve klinknagels** geleverd door persen of door hameren met een **klinkrevolver**. Dit gereedschap geeft met persluchtaandrijving korte opeenvolgende slagen op de steel, terwijl de nagel aan de andere zijde wordt gesteund met een blok, het **tegenhoudijzer**. Wanneer de klinker niet om de constructie heen kan grijpen wegens de afmetingen daarvan, moet dit werk door twee personen worden uitgevoerd.

Een tweede type klinknagel is de **treknagel** of **blinde nagel**. Deze nagels hebben een holle steel met daarin een losse stift. Het vervormen van de steel gebeurt door de stift door de nagel te trekken (zie figuur 9.31b). Bij de eenvoudige **popnagel** wordt de stift geheel door de steel getrokken. Bij andere typen breekt de stift af wanneer de gewenste vervorming is bereikt en blijft deze in de steel achter.

De voordelen van treknagels zijn:
- de constructie hoeft maar vanaf één zijde bereikbaar te zijn (de nagel is dus toe te passen in gesloten constructies);
- de nagel kan altijd door één persoon worden geplaatst.

Treknagels hebben ook nadelen:
- de prijs van de nagel is betrekkelijk hoog;
- de sterkte-eigenschappen zijn in sommige opzichten slechter dan die van massieve nagels, ook bij geavanceerde typen.

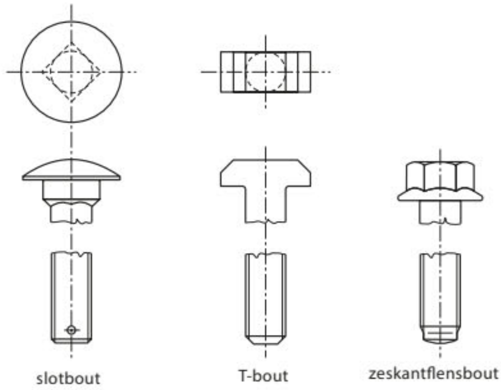
Klinken leent zich zeer goed voor het verbinden van materialen met sterk uiteenlopende eigenschappen. In zware staalconstructies, zoals bruggen, dakspanten en stoomketels, is het klinken echter geheel vervangen door booglassen. Op plaatsen waar vanwege het transport delingen noodzakelijk zijn, worden hoogvaste schroefverbindingen toegepast. In lichtere consumentenartikelen wordt klinken nog wel veel toegepast, omdat het een snelle en goedkope verbindingstechniek is. Hoogwaardige aluminiumsoorten zijn slecht of niet lasbaar. Daarom is klinken in de vliegtuigbouw naast lijmen de belangrijkste verbindingsmethode.

Naast de klinknagels die we hier hebben beschreven, bestaan er nog een aantal andere verbindingselementen met vergelijkbare toepassingen. Deze worden aangeduid met het verzamelbegrip **nieten**.

Bij **ponsklinken** (zie figuur 9.32) dient het verbindingselement tevens als gereedschap voor het maken van het gat; het gatponsen en verbinden vindt tegelijkertijd plaats. Anders dan bij lipverbindingen (zie paragraaf 9.9.1) is hierbij geen voorbewerking nodig.

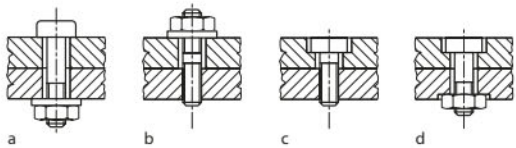
9.8.3 Verbinden zonder plastische vervorming

Verbindingselementen die niet plastisch vervormen en zijn voorzien van schroefdraad vormen ongetwijfeld de meest uitgebreide categorie. Alleen al van bouten en schroeven zijn vele honderden uitvoeringsvormen genormaliseerd. Aan een bout of schroef kun je de volgende details onderscheiden: een kop, een schacht, een schroefdraad en een uiteinde. De kop heeft een dubbele functie: het op elkaar drukken van de te verbinden onderdelen en het vastdraaien, respectievelijk tegenhouden. De keuze van de juiste combinatie van details van verbindingselementen heeft vaak niet alleen te maken met de primaire verbindingsfunctie, maar ook met een gewenste aanvullende functie. Het uiteinde van een bout kan bijvoorbeeld dienen om een onderdeel aan te drukken. De schroefdraad kan dienen als bevestiging, maar ook als afdichting. In het laatste geval moet de binnen- en de buitenschroefdraad veel nauwkeuriger in elkaar passen dan voor de bevestigingsfunctie het geval is, of er moet een afzonderlijk afdichtelement of afdichtmateriaal worden toegepast. In figuur 9.33 zie je een aantal uitvoeringsvormen van schroefbouten.

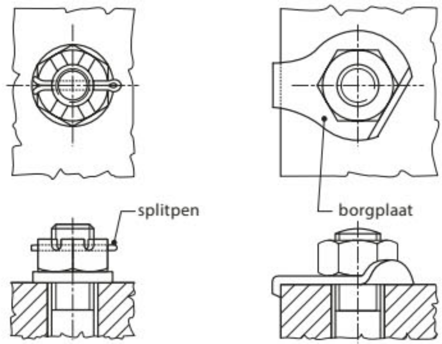


Figuur 9.33 Uitvoeringsvormen van schroefbouten

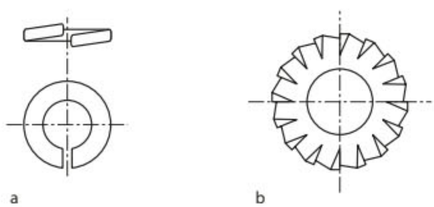
De keuze van de uitvoering van de schroef heeft ook consequenties voor de vorm van de gaten van de te verbinden onderdelen (zie figuur 9.34).
Het is nodig om het aantal verbindingselementen in een constructie zo veel mogelijk te beperken en zo weinig mogelijk verschillende verbindingselementen te gebruiken. Om dat te bereiken, kunnen de afdelingen productontwikkeling en productievoorbereiding samen een montageanalyse maken. Indien verschillende verbindingselementen noodzakelijk zijn, kan men er het beste voor zorgen dat ze duidelijk van elkaar te onderscheiden zijn. Zo is het risico op vergissingen kleiner.



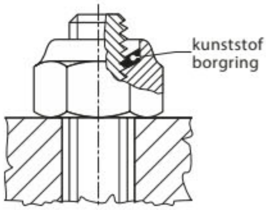
Figuur 9.34 Verschillende uitvoeringsvormen van schroefverbindingen



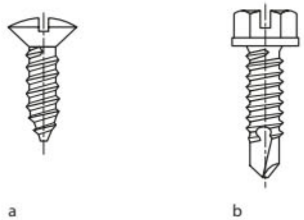
Figuur 9.35 Vormgesloten borgelementen



Figuur 9.36 Krachtgesloten borgelementen: veerring (a) en tandveerring (b)



Figuur 9.37 Zelfborgende moer



Figuur 9.38 Zelftappende schroef (a), zelfborende en -tappende schroef (b)

Borgmiddelen

Bij schroefverbindingen wordt vaak een sluitring of een ander **vereffeningselement** toegepast om oneffenheden in het oppervlak onder de boutkop of moer op te vangen. Daarnaast worden **borgelementen** in de vorm van borgpennen, -plaatjes, en -ringen gebruikt om te voorkomen dat schroefverbindingen op ongewenste tijdstippen losgaan door temperatuurwisselingen of trillingen in de constructie. Borgelementen zijn onder te verdelen in vormgesloten en krachtgesloten borgelementen. **Vormgesloten borgelementen** zijn onder andere de splitpennen en borgplaatjes uit figuur 9.35.

Krachtgesloten borgelementen zijn onder andere de veerringen en tandveerringen uit figuur 9.36. De borging tegen verdraaiing komt hierbij tot stand door de verende werking van de ringen. Daardoor wordt een axiale kracht op de bout uitgeoefend die resulteert in wrijving op de flanken van de schroefdraad.

Tot dezelfde categorie behoren de **zelfborgende moeren** (zie figuur 9.37). Het afzonderlijk borgelement is hierbij vervallen, daardoor is snellere montage mogelijk. Een andere borgmethode is het op de schroefdraad aanbrengen van een speciaal hiervoor bestemde lijmsoort. Kleine, lichte constructies worden soms geborgd door een lik verf. Dit heeft als voordeel dat het goed zichtbaar is wanneer de moer toch verdraaid is.

Combinatie van voorbewerken en verbinden

Bij pen-gatverbindingen moeten in de te verbinden onderdelen gaten aanwezig zijn voordat het verbindingselement kan worden geplaatst. Deze gaten moeten nauwkeurig in elkaars verlengde liggen, anders kan het verbindingselement niet worden ingevoerd. Men heeft de keuze tussen twee mogelijkheden:

- de onderdelen provisorisch op elkaar klemmen, de gaten boren, zo nodig de onderdelen weer losnemen om bramen te verwijderen, en de verbinding aanbrengen;
- de gaten bij de onderdelenfabricage afzonderlijk boren, en bij montage de verbindingen aanbrengen.

Bij de laatste mogelijkheid moeten de delen **uitwisselbaar** zijn. Er gelden daardoor betrekkelijk nauwe toleranties voor de positie van de gaten, en/of men kiest ruime spelingen tussen pen en gat. Montage, onderhoud en reparaties zijn echter veel gemakkelijker uit te voeren dan bij de eerste mogelijkheid. In hoofdstuk 11 komt het begrip uitwisselbaarheid nader aan de orde.

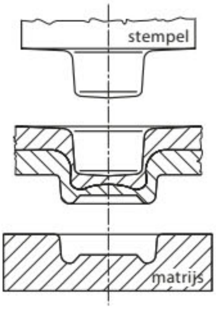
In een aantal gevallen is het mogelijk op de montagekosten te besparen door de noodzakelijke handelingen tot één bewerking samen te voegen. Het bekendste voorbeeld hiervan is de **zelftappende schroef** (zie figuur 9.38a), die het tappen van schroefdraad en de bevestigingsfunctie van de schroef combineert. Een stap verder gaat de **zelfborende en -tappende schroef** uit figuur 9.38b. Deze boort tevens het gat in de onderdelen.

9.9 Vormverbindingen

We maken in deze paragraaf onderscheid tussen verbinden door plastisch vervormen van de onderdelen en verbinden door elastisch vervormen van de onderdelen.

9.9.1 Verbinden door plastisch vervormen van de onderdelen

Verbinden door plastisch omvormen van een van beide of van beide te verbinden onderdelen wordt vooral toegepast voor metaalplaat. Voorbeelden zijn



Figuur 9.39 Doordrukverbinding



Figuur 9.41 Klikverbinding in de behuizing van het Philips-scheerapparaat

felsverbindingen, **rolverbindingen**, **lipverbindingen**, **kraalverbindingen** en **doordrukverbindingen**. Enkele van deze verbindingen hebben we afgebeeld in figuur 9.1. In figuur 9.39 zie je een voorbeeld van een doordrukverbinding. Veel van deze plastische plaatverbindingsmethoden zijn lijnverbindingen. Lijnverbindingen kunnen gas- of vloeistofdicht worden uitgevoerd zonder toevoeging van verbindingsmateriaal of verbindingselementen. Soms worden dergelijke naden nog extra gesoldeerd of gelijmd. Ook wordt er soms een extra afdichtmiddel toegepast. Men gebruikt deze verbindingen onder andere in het ouderwetse conservenblikje met langsnaad en, in grotere uitvoering, in de oliedrum.

9.9.2 Verbinden door elastisch vervormen van de onderdelen

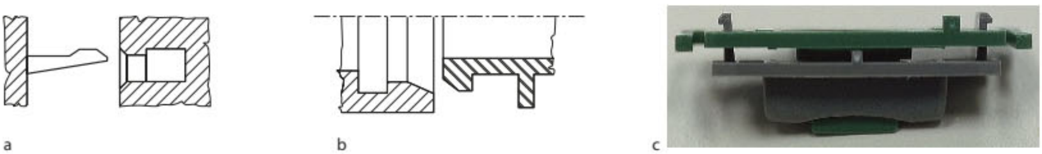
Bij **klikverbindingen** of **snapverbindingen** moeten de onderdelen enigszins elastisch kunnen vervormen. De onderdelen zijn daartoe voorzien van een nok of snaphaak, of van een gat (zie figuur 9.40). Deze verbindingen kunnen snel en goedkoop tot stand worden gebracht. De gebruikte onderdelen zijn iets complexer van vorm en dus iets duurder. Als ze worden vervaardigd door spuitgieten, heeft dit echter nauwelijks invloed op de productiekostprijs.

Bij het bevestigen van onderdelen uit kunststof (zie figuur 9.41), is de toepassing van klikverbindingen dan ook zeer sterk verbreid. Indien nodig moet de ontwerper ervoor zorgen dat de nokken vanaf de buitenzijde kunnen worden verbogen, zodat demontage mogelijk is.

De pers- en krimpverbindingen uit paragraaf 9.2.2 zijn ook verbindingen die tot stand komen door elastisch vervormen van onderdelen. De grootte van de elastische vervorming wordt bij pers- en krimpverbindingen bepaald door de negatieve speling tussen de te verbinden delen. Deze moet nauwkeurig worden berekend, om de krachten die tijdens het gebruik optreden te kunnen overbrengen.

9.10 Neventaken en productiemiddelen

Het vakgebied van de verbindingstechnieken is zeer breed. In aanvulling op de eigenlijke verbindende bewerkingen zijn er bovendien vrijwel altijd neventaken uit te voeren. Bij het ontwerpen van producten, bij de werkvoorbereiding en bij de kostprijsberekening moet met deze neventaken rekening worden gehouden. Voor de uitvoering van deze taken zijn productiemiddelen nodig. De keuze van de machines en gereedschappen voor het uitvoeren van verbindende bewerkingen en de bijbehorende neventaken wordt in de eerste plaats bepaald door de te gebruiken verbindingstechniek en in de tweede plaats door het aantal te maken



a b c

Figuur 9.40 Klikverbindingen: losneembaar (a), niet losneembaar (b) en in een aan/uit-schakelaar (c)

verbindingen. Voor vrijwel alle verbindingstechnieken bestaan reeksen van productiemiddelen met een toenemende automatiseringsgraad. Men kan de productiemiddelen voor het maken van verbindingen niet beschouwen zonder kennis van de montageomgeving waarin de verbindingen worden aangebracht (zie hoofdstuk 11). Ook enige kennis van productiemachines en van automatisering (zie hoofdstuk 13), en van productiekosten (zie hoofdstuk 17), is noodzakelijk.

Belangrijke neventaken zijn:
- Het voorbereiden van het maken van de verbindingen. Onderdelen voorbereiden, bijvoorbeeld door schuine laskanten of boutgaten aan te brengen. Vaak is een reiniging of het aanbrengen van een beschermlaag noodzakelijk. Voor deze voorbereidingen zijn zeer uiteenlopende productiemiddelen nodig.
- Het positioneren van de delen ten opzichte van elkaar. In veel gevallen is het nodig om de onderdelen in de gewenste stand ten opzichte van elkaar te brengen en te houden. De hulpmiddelen hiervoor lopen uiteen van eenvoudige klemmen tot kostbare, productspecifieke lasmallen en montagemallen.
- Het verwijderen van lasslak, lijm- en soldeerresten, het borgen van boutverbindingen, het plaatsen van beschermkapjes over boutkoppen. Het richten is vooral bij lasverbindingen van belang, om vormveranderingen die door krimpspanningen zijn ontstaan te corrigeren (zie paragraaf 9.3.5). Spanningsarm gloeien kan noodzakelijk zijn bij hoogbelaste onderdelen en bij onderdelen die nauwkeurig bewerkt moeten worden. Dit vereist grote en kostbare ovens.
- Het verrichten van kwaliteitscontrole. Bijvoorbeeld het uitvoeren van geometrische metingen om vast te stellen of de samenstelling voldoet aan de vereiste toleranties. In andere gevallen moet bijvoorbeeld de sterkte of de gasdichtheid worden beproefd. Hierbij zijn methoden voor niet-destructief onderzoek van belang (zie paragraaf 12.9).

Samenvatting

We kunnen de verbindingsmethoden indelen op grond van losneembaarheid, op grond van het gebruikte verbindingsprincipe en op grond van de geometrie.

Bij lassen worden de te verbinden delen plaatselijk in vloeibare of deegachtige toestand gebracht, bij solderen en lijmen ontstaat de verbinding door middel van een tussenlaag. Bij solderen en lijmen moet men cohesie en adhesie afzonderlijk beschouwen. In sommige gevallen zijn soldeerverbindingen als beperkt losneembaar te beschouwen.

Er bestaan veel verschillende pen-gatverbindingen. De belangrijkste zijn klinkverbindingen en bout- en schroefverbindingen. Bij klinkverbindingen vervormt het verbindingselement plastisch, bij bout- en schroefverbindingen niet. Daardoor zijn klinkverbindingen beperkt losneembaar en bout- en schroefverbindingen volledig losneembaar.

Ten slotte zijn er verbindingen die ontstaan door het plastisch of elastisch vervormen van de onderdelen. Afhankelijk van de gekozen passing zijn pers- en krimpverbindingen niet of beperkt losneembaar. Klikverbindingen komen tot stand door elastische vervorming van de onderdelen. Wanneer het ontwerp daarin voorziet, zijn deze verbindingen losneembaar.

Bij de keuze van een verbindingstechniek zijn naast de functionele eigenschappen van de verbinding ook de productietechnische aspecten, waaronder de neventaken, van groot belang. Bij lijmverbindingen verdienen verder milieueffecten door verontreinigingen van verbindingsmaterialen en de reinigingsmiddelen extra aandacht.

Literatuur

9.1 Kalpakjian, S., Schmid S.R., *Manufacturing Engineering and Technology*, 7th edition, Pearson, 2014, ISBN 978-0-13-312874-1. Hoofdstuk 30 'Fusion-welding processes'; hoofdstuk 31 'Solid-state welding processes'; hoofdstuk 32 'Brazing, soldering, adhesive-bonding and mechanical-fastening processes'.

9.2 Groover M.P., *Principles of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems*, 5th edition, John Wiley & Sons Inc., 2013, ISBN 978-1-118-47140-1. Hoofdstuk 25 'Fundamentals of welding'; hoofdstuk 26 'Welding processes'; hoofdstuk 27 'Brazing, soldering and adhesive processes'; hoofdstuk 28 'Mechanical assembly'.

9.3 Den Ouden G., *Lastechnologie*, VSSD, Delft, 2000, ISBN 978-90-407-1285-2.

9.4 Parmley R.O., *Standard Handbook of Fastening & Joining*, MacGraw-Hill,1996, ISBN 978-0-07-048589-1.

9.5 Hard- en zachtsolderen; algemeen, *Voorlichtingsbladen voor de metaalindustrie*: VM 44, uitgave FME-CWM.

9.6 Lijmen; algemeen, *Voorlichtingsbladen voor de metaalindustrie*: VM 86, uitgave FME-CWM.

9.7 Gelaste constructies; richtlijnen voor ontwerp, bestek en uitvoering, *Voorlichtingsbladen voor de metaalindustrie*: VM 106, uitgave FME-CWM.

9.8 *Engineering Dossiers Verbindingstechnieken*, ten Hagen & Stam, 2004.

9.9 Ehrenstein G.W., *Handbuch Kunststofverbindungstechnik*, 1e druk, Carl Hanser, 2005, ISBN 978-3-446-22668-5.

Oefenvragen

9.1 Noem de belangrijkste kenmerken die van belang zijn voor de keuze van een verbindingsmethode. Geef voor elk van deze kenmerken een voorbeeld van een situatie waarin dat kenmerk van groot belang is.

9.2 Bekijk de schroefverbindingen in figuur 9.34. Noem van elke verbinding een voordeel en een nadeel.

9.3 Bespreek het verbinden van metalen onderdelen met keramische onderdelen.
- a Bespreek de methoden die in aanmerking komen.
- b Maakt het nog verschil of een klein keramisch onderdeel aan een groot metalen voorwerp moet worden bevestigd of andersom? Motiveer je antwoord.

9.4 Bedenk welke uiteenlopende eisen gesteld kunnen worden aan montagemallen.

9.5 Het lijmen van kunststoffen is lastig, omdat de te verbinden oppervlakken meestal moeten worden voorbereid. Ze moeten bijvoorbeeld worden gereinigd met een organisch oplosmiddel. Bepaalde polymeren zijn moeilijk te lijmen. Ook technieken als wrijvingslassen, vibratielassen en ultrasoonlassen hebben echter hun bezwaren. Recent is het laserlassen van kunststoffen tot ontwikkeling gekomen.
- a Bedenk bezwaren van de genoemde lasprocessen voor kunststoffen.
- b Bedenk een aantal voordelen en beperkingen van het laserlassen van kunststoffen.

inclusief website!

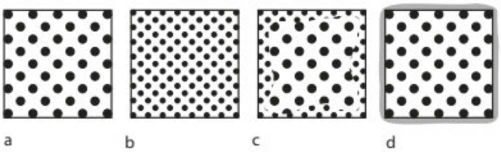
Op www.industrieleproductie.nl vind je de antwoorden op deze vragen, maar ook extra studie- en oefenmateriaal, zoals video's en meer opgaven.

10 Veranderen van materiaaleigenschappen

In dit hoofdstuk behandelen we technieken die tot doel hebben de eigenschappen van werkstukmaterialen te veranderen om deze beter geschikt te maken voor de functie van de werkstukken. Deze technieken kunnen de gehele doorsnede van werkstukmaterialen veranderen, of alleen de oppervlakken.
Het doel van procesconditionering is het aanpassen van materiaaleigenschappen en oppervlakken aan de eisen van bepaalde bewerkingen.

10.1 Inleiding

Er bestaan veel verschillende constructiematerialen, met zeer uiteenlopende eigenschappen. De metalen nemen daarin een belangrijke plaats in. De eigenschappen van metalen zijn niet alleen afhankelijk van de chemische samenstelling, maar ook van de structuur. Die structuur wordt in belangrijke mate bepaald door de manier waarop een metalen voorwerp is ontstaan en welke spanningen, vervormingen en temperaturen daarbij zijn opgetreden. Vaak is het nodig extra behandelingen toe te passen om de gewenste structuur te bereiken. We kunnen hierbij onderscheid maken tussen bulkbehandelingen en oppervlaktebehandelingen. **Bulkbehandelingen** zijn behandelingen die diep (enkele tientallen mm) doordringen onder het oppervlak van het werkstuk. **Oppervlaktebehandelingen** zijn behandelingen waarvan de invloed zich beperkt tot een dunne laag (meestal minder dan een mm dik) aan het oppervlak. Bij bulkbehandelingen wordt de verandering van materiaaleigenschappen vrijwel uitsluitend verkregen door een opeenvolging van opwarmen en afkoelen. De gewenste temperatuur, verblijfsduur in de oven en de snelheid van opwarmen en afkoelen zijn afhankelijk van de aard van de metaallegering en het effect dat moet worden bereikt. Men spreekt daarom ook wel van **warmtebehandelingen**. Figuur 10.1 toont de verschillende principes van aanpassing van materiaaleigenschappen.



a b c d

Figuur 10.1 Principes van aanpassing van materiaaleigenschappen. De figuur toont vier doorsneden: uitgangsmateriaal (a), bulkbehandeling (b), verandering van oppervlaktelaag (c) en bedekken (d)

Bij het bewerken ontstaan soms ongewenste effecten die na de vormgeving door een speciale behandeling weer moeten worden weggenomen. In andere gevallen worden de gewenste eigenschappen pas verkregen na de bewerking.
De bespreking van warmtebehandelingen in dit boek is zeer beknopt, omdat we in hoofdstuk 2 de materiaalkunde ook slechts kort hebben behandeld. Voor een meer diepgaande behandeling verwijzen we naar materiaalkundeboeken zoals [10.1] tot en met [10.4]. In veel gevallen zijn warmtebehandelingen een essentieel onderdeel van fabricagemethoden, vandaar dat we ze wel bespreken in dit boek. Meestal worden warmtebehandelingen pas uitgevoerd nadat de vormgeving grotendeels heeft plaatsgevonden. Bij warmtebehandelingen kan het inwendige spanningsevenwicht in een werkstuk veranderen. Als dat gebeurt, treedt gewoonlijk enige vervorming op. Daarom worden bewerkingen die nodig zijn om aan de gewenste nauwe toleranties te voldoen pas na de warmtebehandeling uitgevoerd. In paragraaf 10.6 zal duidelijk worden dat er ook situaties zijn waarbij warmtebehandelingen moeten worden uitgevoerd voordat bewerkingen plaatsvinden, of zelfs tussen opeenvolgende bewerkingen in.

10.2 Warmtebehandelingen van ijzerlegeringen

We kunnen de warmtebehandelingen in drie groepen indelen. Bij **gloeien** gaat het voornamelijk om het wegnemen van ongewenste effecten. Bij **harden** gaat het vooral om het verhogen van de hardheid. Bij **veredelen** gaat het vooral om het verhogen van de treksterkte. We bespreken deze processen in de volgende paragrafen.

10.2.1 Gloeien

Door het optreden van versteviging bij het plastisch vervormen van metalen nemen de treksterkte en de hardheid toe als de vervormingsgraad toeneemt. Daarnaast wordt het materiaal echter brosser en neemt de weerstand tegen vervorming ook toe. Verdere plastische vervorming wordt daardoor steeds moeilijker. Dit effect kan worden verholpen door het materiaal te gloeien. Meestal wordt het materiaal hierbij verhit tot een temperatuur waarbij rekristallisatie optreedt, de rekristallisatietemperatuur. Het materiaal moet dan wel voldoende intensief vervormd zijn, anders ontstaan er te weinig kiemen voor nieuwe kristallen en wordt het materiaal grofkorrelig met minder goede mechanische eigenschappen. Deze behandeling heet **uitgloeien** of **rekristallisatiegloeien**. Afhankelijk van de temperatuur zal onder een bepaalde deformatiegraad rekristallisatiegloeien niet meer mogelijk zijn. In dat geval kunnen de inwendige spanningen nog worden gereduceerd door **spanningsarm gloeien**. Hierbij wordt het materiaal langdurig tot net onder de rekristallisatietemperatuur verhit, waardoor de rekgrens van het materiaal sterk daalt. De versteviging wordt afgebouwd en inwendige spanningen nemen af. Het opwarmen en afkoelen dient langzaam te geschieden. Spanningsarm gloeien wordt ook veel toegepast om inwendige spanningen op te heffen die zijn ontstaan door verschil in afkoelsnelheid bij gietstukken of lasconstructies. Door het wegnemen van materiaal verandert het inwendige spanningsevenwicht en vervormen de werkstukken. Het is daarbij moeilijk om aan nauwe toleranties voor maat en vorm te voldoen. Dit is aan de orde bij verspanende bewerkingen en kan worden voorkómen door **herstelgloeien**. Zoals we in paragraaf 2.2.3 uiteen hebben gezet, ontstaat bij afkoeling van metalen vaak segregatie, waardoor de materiaaleigenschappen minder goed zijn. Dit kan ongedaan worden gemaakt door **homogeengloeien**.

Alle gloeibehandelingen worden uitgevoerd na het gieten, omvormen of lassen, maar vóór de verspanende bewerkingen.

10.2.2 Harden

Als de weerstand tegen krassen en slijtage na de vormgeving verhoogd moet worden, kan dat op twee geheel verschillende manieren worden gedaan: door een warmtebehandeling van het bulkmateriaal (het onderwerp van deze paragraaf), of door een oppervlaktebehandeling (zie paragraaf 10.4).

De bekendste manier van het harden van ijzerlegeringen is **transformatieharden**. Dit proces is gebaseerd op de omzetting van ijzer van een kubisch ruimtelijke structuur in een kubisch vlakgecentreerde structuur (zie paragraaf 2.2.1). Dit wordt bereikt door langzaam verhitten tot boven de temperatuur waarbij de structuuromzetting optreedt, en na een kort verblijf op deze temperatuur gevolgd door snelle afkoeling, meestal door **afschrikken** in water of olie. Dit proces komt erg nauw. De juiste temperatuur, opwarm- en afkoelsnelheden zijn voor elke legering anders. De daadwerkelijk optredende opwarm- en afkoelsnelheden hangen af van de eigenschappen van de oven, de vorm en afmetingen van het werkstuk, de plaats van het werkstuk in de oven en de wijze van afschrikken. Verder is het zo dat bij dikwandige werkstukken het buitenste gedeelte veel sneller afkoelt dan het binnenste, waardoor de transformatie niet meer door het gehele werkstuk optreedt. De structuuromzetting vindt plaats tot op een bepaalde hardingsdiepte. Niet alle ijzerlegeringen zijn geschikt voor transformatieharding. Ongelegeerd staal met minder dan 0,25% koolstof is bijvoorbeeld ongeschikt.

Gehard staal is veel te bros voor normaal gebruik en kan zelfs spontaan scheuren. Het moet daarom altijd een extra warmtebehandeling ondergaan, het **ontlaten**. Het doel van ontlaten is het verminderen van de inwendige spanningen. De hiervoor benodigde temperatuur is vrij laag (bijvoorbeeld 180 °C) en de verblijfsduur in de oven is vrij kort (30-60 minuten).

10.2.3 Veredelen

Onder **veredelen** verstaat men harden, gevolgd door ontlaten bij een hogere temperatuur dan 180 °C. Naarmate de temperatuur hoger is, nemen de hardheid en de treksterkte van het materiaal af en

nemen de taaiheid en de breekrek toe. Het doel van veredelen is het verhogen van de weerstand tegen stotende of snel wissende belastingen (vermoeiing). Door de juiste keuze van de temperatuur kunnen de gewenste eigenschappen verkregen worden voor verschillende toepassingen. Veredelen wordt bijvoorbeeld toegepast bij de productie van zwaar belaste machinedelen.
Werkstukken moeten na het harden of veredelen geslepen worden of op andere wijze fijn nabewerkt worden om de uiteindelijk gewenste vorm- en maattoleranties en ruwheid te bereiken. Indien de kans op vervormingen groot is, moet de bewerkingstoeslag vergroot worden. Men moet zien te voorkomen dat door de nabewerking de beïnvloede laag met de verbeterde structuur verwijderd wordt. De opeenvolgende bewerkingen moeten daarom zorgvuldig op elkaar worden afgestemd.

10.3 Warmtebehandelingen van aluminiumlegeringen

Warmtebehandeling van aluminiumlegeringen wordt vooral toegepast bij hoge-sterktelegeringen zoals gebruikelijk in de vliegtuigbouw. **Zachtgloeien** is gloeien gedurende langere tijd onder de rekristallisatietemperatuur, gevolgd door langzaam afkoelen door de oven uit te zetten. In zachtgegloeide toestand is het materiaal betrekkelijk goed vervormbaar. De sterkte van het materiaal is dan echter laag.

Oplosgloeien is gloeien bij een hogere temperatuur, net onder de smelttemperatuur en dat gedurende een betrekkelijk korte tijd. Het wordt gevolgd door afschrikken, bijvoorbeeld door onderdompelen in water bij kamertemperatuur. Het materiaal is slechts tot zo'n 30 minuten na het afschrikken betrekkelijk zacht en redelijk goed vervormbaar. Door **precipitatieharden** nemen na het afschrikken de hardheid en sterkte geleidelijk toe. Sommige legeringen bereiken na circa 100 uur verblijf op kamertemperatuur hun uiteindelijke sterkte. Voor andere legeringen is hiervoor weer een verhitting van 150-180 °C nodig.
Men kan omvormprocessen toepassen op het materiaal in zachtgegloeide toestand of kort na het afschrikken. Bij niet al te sterke vervormingen heeft kort na het afschrikken de voorkeur, omdat bij het afschrikken nog aanzienlijke vervormingen kunnen optreden.

10.4 Oppervlakteveranderingen

10.4.1 Inleiding

Het functionele gedrag van onderdelen in mechanische constructies (inclusief mechanismen en machines) wordt mede bepaald door de toestand van de oppervlakken. De keuze van de juiste oppervlakteveranderingstechniek hangt af van het materiaal en het doel dat men nastreeft. Het spectrum van mogelijkheden breidt zich steeds verder uit. Deze paragraaf kan dan ook niet meer dan een summier overzicht bieden van de oppervlakteveranderingstechnieken.
Redenen voor het toepassen van een oppervlakteveranderingstechniek kunnen zijn:
- verhoging van de weerstand tegen slijtage en indrukking (van allerlei machineonderdelen, gereedschappen);
- vermindering van wrijving (idem);
- verbetering van smering (door het beter hechten van een smeermiddel of het aanbrengen van een zelfsmerende laag);
- verhoging van de weerstand tegen corrosie en oxidatie (zowel in de buitenlucht als in allerlei agressieve milieus);
- verhoging van de weerstand tegen vermoeiing (onder andere van roterende assen);
- verfraaiing (lakken en galvanisch bewerken in allerlei kleuren, maar ook het aanbrengen van gewenste ruwheidpatronen door bijvoorbeeld schuren of borstelen);
- isolatie (tegen elektrische spanning of warmteoverdracht);
- reparatie (herstel van gesleten oppervlakken);
- reinigen;
- verbetering van hechting (van verf, lijm, smeermiddelen);
- vermindering van adhesie (van elektrische contacten);
- betere uitvoerbaarheid van bewerkingen (zie paragraaf 10.6).

De **oppervlaktetechnologie** is het vakgebied dat zich richt op het aanpassen van de eigenschappen van technische oppervlakken aan de functie ervan.

10.4.2 Indeling van oppervlakteveranderingstechnieken

Onder oppervlakteveranderingstechnieken verstaan we de technieken die tot doel hebben de oppervlak-

tegesteldheid, de chemische of de fysische eigenschappen van oppervlakken te veranderen zonder de vorm van de werkstukken of van de eigenschappen van het bulkmateriaal aan te tasten.

We kunnen de oppervlakteveranderingstechnieken in drie groepen indelen:
- technieken gericht op het veranderen van de oppervlaktegesteldheid;
- technieken gericht op het veranderen van de eigenschappen van een dunne oppervlaktelaag;
- technieken gericht op het bekleden van het oppervlak met een ander materiaal.

In de volgende paragrafen komen deze groepen een voor een aan bod. Erg scherp is deze indeling overigens niet. Door veel van de technieken die tot doel hebben de oppervlaktegesteldheid te veranderen, worden de materiaaleigenschappen van de oppervlaktelaag ook vaak enigszins aangetast. Omgekeerd geldt hetzelfde: door processen die tot doel hebben de materiaaleigenschappen te veranderen, verandert de oppervlaktegesteldheid ook vaak enigszins. We moeten dus onderscheid maken tussen doel en bijwerking.
Een andere indeling is gebaseerd op de aard van de gebruikte techniek. Deze kan mechanisch, chemisch, of fysisch zijn.

10.4.3 Veranderen van de oppervlaktegesteldheid

Bij vrijwel alle bewerkingen die we in dit boek behandelen komt de oppervlaktegesteldheid (zie paragraaf 12.6.3) tot stand met behulp van gereedschap. Dat kan een stilstaande afbeelding zijn van een zandvorm of gietmatrijs. Bij omvormbewerkingen is soms op het werkstuk een stilstaand gedeelte van een omvormgereedschap afgebeeld, maar er kunnen ook glijsporen op het werkstuk te zien zijn, veroorzaakt door het gereedschap. Bovendien komen soms enkele gedeelten van het werkstukoppervlak tot stand zonder contact met een gereedschap. Bij verspanende bewerkingen ontstaat het werkstukoppervlak door de banen van het gereedschap langs of door het werkstuk. Bij de niet-mechanische processen (zie hoofdstuk 6), is er geen sprake van contact met een gereedschap. In dit geval wordt de ruwheid van de werkstukken door de instelling van fysische of chemische processen bepaald. Bij de meeste processen voor de verandering van de oppervlaktegesteldheid is er evenmin een duidelijke dwang van een gereedschap op het materiaal. De oppervlaktegesteldheid wordt bepaald door de instelling van de procesvariabelen.

Mechanische processen

Kogelstralen (zie paragraaf 6.4.2) en burnishing worden toegepast voor het verkrijgen van een lagere ruwheid of het inbrengen van drukspanningen in de oppervlaktelaag van het werkstuk. Het doel is om een verbetering van de weerstand tegen vermoeiing te realiseren.

Bij **kogelstralen** worden door de kogels echter ook de ruwheidstoppen die zijn ontstaan bij voorgaande bewerkingen enigszins afgevlakt. Hierdoor wordt de ruwheid minder. Bij zeer gladde oppervlakken kan de ruwheid juist toenemen.
Bij **burnishing** wordt een harde kogel of rol met enige kracht loodrecht op het werkstukoppervlak gedrukt en tegelijkertijd met een voedingsbeweging over het oppervlak bewogen. Bij een variant wordt een harde kogel door een gat met een iets kleinere diameter geperst. De diameter van het gat wordt daarbij tevens binnen nauwe toleranties gekalibreerd.
Soortgelijke effecten kunnen worden verkregen door het gebruik van hogedrukwaterstralen. De energiedichtheid dient dan lager te zijn dan voor waterstraalsnijden (zie paragrafen 6.4.3 en 7.3.5). Deze lagere energiedichtheid kan worden gerealiseerd door gebruik te maken van een lagere druk of een wijdere spuitmond.

Polijsten is een abrasieve bewerking om de toppen van de ruwheid te laten afnemen en de glans te verhogen. Een verend lichaam, voorzien van zeer fijne en relatief zachte korrels, wordt onder druk over een werkstukoppervlak bewogen. Het verende lichaam is vaak een roterend pakket doeken en de korrels zijn gebonden in een pasta.

Bij veel bewerkingen ontstaan bramen. Bij het gebruik van matrijzen, zoals bij gieten of smeden, ontstaat een braam op het deelvlak. Bij verspanen ontstaan op de snijlijn van twee elkaar snijdende vlakken resten van werkstukmateriaal die buiten de gewenste contour uitsteken (zie figuur 10.2). Bramen kunnen vervormen, afbreken of tussen de onderdelen terechtkomen. Daardoor kunnen ze de goede werking van constructies belemmeren. Ook leiden ze vaak tot verwondingen. Bij voor-



Figuur 10.2 Bramen bij geboorde gaten

keur voorkomt men dat er bramen ontstaan. Dat kan door te voorkomen dat een gereedschap over een rand van het werkstuk uittreedt. Dat is echter niet altijd mogelijk. Vaak worden werkstukken voorzien van een smalle rand (0,5 tot 1 mm breed) onder 45° om het ontstaan van bramen tegen te gaan. In veel gevallen zijn extra bewerkingen nodig om de bramen te verwijderen. Men noemt dit **ontbramen**. Vaak is dit handwerk waarbij allerlei speciale handgereedschappen, zoals schraapstalen en bandslijpmachines, worden gebruikt. Voor grote aantallen kleine onderdelen wordt **trommelen** toegepast. Hierbij worden de onderdelen los gestort in een vibrerende trommel, gevuld met slijpsteentjes (chips) en meestal met een vloeistof. Na enige tijd worden de afgebraamde werkstukken uit de trommel gehaald. In wezen is dit een slijpbewerking, daarom noemen we het ook wel **glijslijpen**. Door aanpassing van de machines, de chips en de vloeistof kan het proces op uiteenlopende vormen en materialen worden afgestemd. Ook ontbramen, kanten breken, polijsten, matteren, reinigen en ontvetten zijn door middel van trommelen mogelijk.

Chemische processen

Het polijsten kan ook worden uitgevoerd door een etsmiddel te gebruiken. Dit wordt **chemisch polijsten** genoemd. Hierbij wordt gebruikgemaakt van het feit dat de ruwheidstoppen gewoonlijk sneller worden aangetast door het etsmiddel dan de dalen. Het ruwheidsprofiel wordt daardoor afgevlakt. Dit principe kan ook worden toegepast bij ontbramen.

Fysische processen

Twee fysische processen zijn **elektrochemisch etsen** en **elektrochemisch polijsten**. Ook bij materiaalafname door elektrolyse (zie paragraaf 6.2.3) worden de ruwheidstoppen eerder aangetast dan de dalen. Als de procescondities goed zijn ingesteld, kan zo een vermindering van de ruwheid en een verhoging van de glans worden verkregen.

Thermische processen

Bij **thermisch ontbramen** worden de werkstukken in een kamer geplaatst. Deze wordt gevuld met een mengsel van methaan en zuurstof. Bij het ontsteken ontstaat kortstondig een temperatuur van circa 3000 °C. Door hun relatief grote oppervlakte bereiken de bramen een hoge temperatuur en verbranden ze door de aanwezige zuurstof. Het bulkmateriaal wordt maar weinig opgewarmd.

10.4.4 Veranderen van oppervlakte-eigenschappen

Er bestaat een groot aantal manieren om de eigenschappen van de oppervlaktelaag te veranderen. De doelen die men hierbij nastreeft zijn zeer divers. Bovendien worden dergelijke processen op vrijwel alle materialen toegepast. We denken dat de volgende indeling helpt bij het ordenen van de verschillende technieken:

- **Conditioneren** staat voor het veranderen van de eigenschappen van de oppervlaktelaag van het werkstuk, zonder de samenstelling te veranderen.
- **Converteren** staat voor het veranderen van de samenstelling van een (zeer) dunne laag van het basismateriaal.

Conditioneren

Bij **vlamharden** vindt het opwarmen vrij snel plaats met een brander, waarbij de onderlaag relatief koud blijft. De verharde laag is slechts enkele millimeters dik. Deze techniek wordt bijvoorbeeld gebruikt voor de geleidingen van gereedschapswerktuigen.

Nog sneller opwarmen en afkoelen is mogelijk door het gebruik van een laser. Bij dit **laserharden** (zie figuur 6.30) wordt de geharde laag dunner dan bij vlamharden. Hiermee kan de hardheid van kleine gedeelten van oppervlakken worden aangepast aan specifieke gebruiksdoelen. In figuur 10.3 zie je een voorbeeld hiervan. Bij een nog hogere energiedichtheid van de laserstraal en een nog kortere opwarmtijd, smelt een dunne laag van het oppervlaktemateriaal. Daarna koelt deze laag onmiddellijk weer af. Het gesmolten materiaal stolt zo snel dat de amorfe toestand van de smelt in vaste toestand behouden blijft. Dit proces noemen we **glazen** (zie figuur 6.30).



Figuur 10.3 Doorsnede van een door middel van laserharden verkregen harde oppervlaktelaag van een kettingwiel (Demarlaser)

Het betreft in dit geval dus geen transformatieharden. Een toepassing van glazen is het verlagen van de wrijving tussen stalen onderdelen.

Wanneer laserpulsen met een zeer hoge energiedichtheid en zeer korte verblijftijden metalen oppervlakken treffen, wordt de interne structuur van de kristallen in de oppervlaktelaag verstoord en treedt eveneens verharding op. Dit noemen we **schokharden** (zie figuur 6.30). Een nadeel hiervan is dat de beïnvloede laag uiterst dun is. Deze techniek leent zich vooral voor kleine oppervlakken op kleine voorwerpen. Een soortgelijk effect treedt op wanneer schokgolven veroorzaakt door explosies in metalen voorwerpen optreden.
Ook de methoden voor het inbrengen van drukspanningen in de oppervlaktelaag, burnishing en kogelstralen (zie paragraaf 10.4.3), behoren tot het conditioneren.

Converteren

De hardheid die bij staal door transformatieharden (zie paragraaf 10.2.2) kan worden bereikt, neemt toe met het koolstofgehalte. Staalsoorten met een laag koolstofgehalte zijn echter beter geschikt voor omvormbewerkingen. Voor veel werkstukken is een zachte, taaie kern met een harde, slijtvaste buitenlaag een goede combinatie. Een manier om dit te bereiken is door na de vormgeving het werkstuk te **carboneren** en het vervolgens te harden zoals aangegeven in paragraaf 10.2.2. Het doel van carboneren is het verhogen van het koolstofgehalte in de oppervlaktelaag. Dit geschiedt door een langdurig verblijf op hogere temperatuur in een ruimte gevuld met een koolstofhoudende vloeistof, gas of vaste stof. Deze techniek wordt toegepast op allerlei machineonderdelen. De combinatie van carboneren gevolgd door transformatieharden wordt **inzetharden** genoemd.

Een techniek die enigszins lijkt op inzetharden is **nitreren**. Hierbij neemt de hardheid van speciale gelegeerde staalsoorten, de nitreerstalen, toe door een verblijf op hogere temperatuur in een gas of vloeistof die stikstof afgeeft. Deze stikstof verbindt zich met de legeringselementen tot zeer harde nitriden. Zo kan een hogere hardheid worden bereikt dan met transformatieharding. Bovendien is het effect van de harde nitriden onmiddellijk merkbaar en is er geen hardingsprocedure meer nodig. Nadelen van nitreren in vergelijking met carboneren zijn de relatief zeer lange verblijftijd in de oven en een kleinere hardingsdiepte.

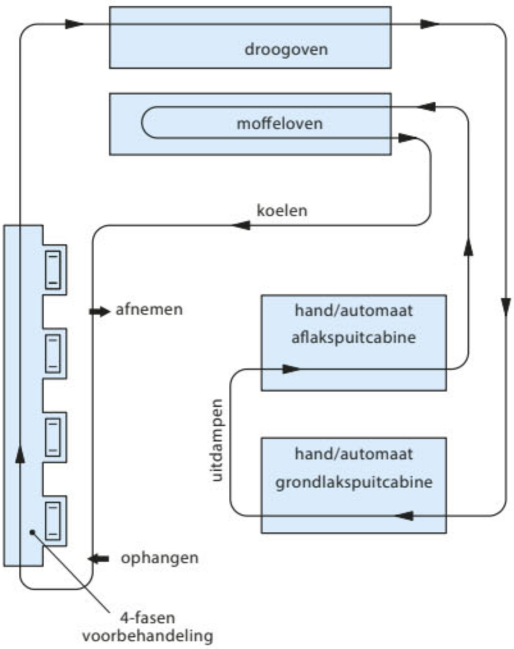
Anodiseren is een techniek waarbij aluminium werkstukken in een elektrisch geleidende vloeistof worden ondergedompeld en onder elektrische spanning worden gezet. Hierdoor ontstaat een dichte oxidelaag die de corrosiebestendigheid sterk verbetert. Bij dit proces kan tegelijkertijd een gewenste kleur worden aangebracht. Als de procescondities juist zijn, kan ook een zeer goede hechting voor verf en lijm worden verkregen (zie figuur 9.29). Dit laatste wordt veel toegepast in de vliegtuigbouw.

10.4.5 Bekleden

Onder **bekleden** verstaan we technieken die een laag opbrengen met andere eigenschappen dan het materiaal eronder. De aard van de deklaag en de technieken voor het opbrengen zijn zeer divers. Bekleden kan gebeuren met verf of lak, maar ook met een metallische of keramische deklaag.

Verf en verwante deklagen

Verf is een dikvloeibare pigmenthoudende massa bestemd om op voorwerpen aan te brengen. Verf kan worden aangebracht ter bescherming, ter verfraaiing of om onderscheid mogelijk te maken. De verf hardt uit tot een vaste laag. Het hoofdbestanddeel van verf wordt gevormd door witte of gekleurde dekkende stoffen, de **pigmenten**. Deze worden gemengd met een bindmiddel, dat na het aanbrengen van de verf door een chemisch proces uithardt. Om de verf goed te kunnen verwerken, wordt er een oplosmiddel aan toegevoegd. De pigmenten kunnen van natuurlijk of synthetisch materiaal zijn, evenals de bindmiddelen en de oplosmiddelen. Veel oplosmiddelen zijn schadelijk voor de gezondheid en het milieu. Zij worden daarom steeds vaker vervangen door water. Ook kunnen extra stoffen



Figuur 10.4 De lay-out van een lakstraat

worden toegevoegd voor bijzondere doeleinden, zoals het verkrijgen van een betere hechting, het beter mogelijk maken van dun uitstrijken of het voorkomen van ontmenging. Verfsoorten met hogere glans en betere duurzaamheid worden vaak **lak** genoemd. Er bestaan veel verschillende soorten verf, met verschillende eigenschappen.

Verschillende factoren zijn belangrijk voor de duurzaamheid van een verflaag. Niet alleen de verf zelf, maar ook de hechting en de wijze van aanbrengen (bijvoorbeeld met de kwast, met de roller, of door spuiten). De kwaliteit van de hechting hangt af van het basismateriaal, het ruwheidsprofiel en de reiniging. Daarom wordt er in de auto-industrie veel aandacht besteed aan het ruwheidsprofiel van carrosserieplaat. Ook de reiniging is belangrijk. De hechting van verf kan worden versterkt door het gebruik van speciale hechtmiddelen of grondverf. Verven moeten na het aanbrengen drogen. In industriële bedrijven zijn hiervoor soms uitgebreide drooginstallaties noodzakelijk. Afhankelijk van de samenstelling van de verf is de droging een fysisch of een chemisch proces. De optimale droogomstandigheden verschillen per samenstelling. In veel gevallen moeten meerdere lagen verf na elkaar worden aangebracht. Tussendoor moet de verf dan steeds drogen. De soort verf, de methode van aanbrengen en de methode van drogen kunnen voor de opeenvolgende lagen verschillend zijn. Industriële verfinstallaties vereisen daarom uitgebreide voorzieningen, aangepast aan de producten en de soorten verf. In figuur 10.4 zie je hiervan een voorbeeld. De lay-out van de weergegeven lakstraat toont een zone voor het ophangen en het afnemen van producten aan de transporteur, vier dompelbakken voor de voorbehandeling, een droogoven, cabines voor het met de hand spuiten en automatisch spuiten van een grondlak en een aflak, en een moffeloven.
Er zijn nog verschillende andere methoden voor het aanbrengen van verf en andere deklagen, waaronder rollen, het voeren van de werkstukken door een lakgordijn en het dompelen in baden. De laatste methode wordt bijvoorbeeld gebruikt voor de eerste laag van autocarrosserieën.

Een bijzonder duurzame laag wordt verkregen door **moffelen**. Hierbij worden voorwerpen waarop een speciale soort verf is aangebracht in een ruimte verhit. De laklaag verhardt dan en hecht beter. Hierdoor wordt een hoge duurzaamheid van de laklaag verkregen. Het proces wordt onder andere gebruikt bij de productie van fietsframes.

De dikte van de beschermlaag die door verven kan worden verkregen, is beperkt, zelfs wanneer meerdere lagen worden aangebracht. Bij **poedercoating**, ook wel **poederlakken** genoemd, speelt deze beperking minder. Hierbij wordt een poeder van de gewenste kleur, bestaande uit polymeren, op een elektrostatisch opgeladen voorwerp gespoten. De poeder wordt gelijkmatig over het oppervlak verdeeld, waarna het product door een oven wordt gevoerd. De gesmolten korrels hechten zich aan elkaar en aan het product. Dit geeft een uitstekende bescherming van producten die langdurig aan de buitenlucht worden blootgesteld. Voorbeelden hiervan zijn gevelelementen voor gebouwen en gaas voor afzettingen. Poederlakken heeft verschillende voordelen: het opbrengen is gemakkelijk te automatiseren, er is geen emissie van oplosmiddelen en er is minder materiaalverlies door terugwinning van korrels.

Het opbrengen van glasachtige deklagen noemt men **emailleren**. Dit is een eeuwenoude techniek voor het aanbrengen van kleur op sieraden. Hierbij worden poedervormige materialen met een bindmiddel tot een pasta gemengd. Die pasta wordt

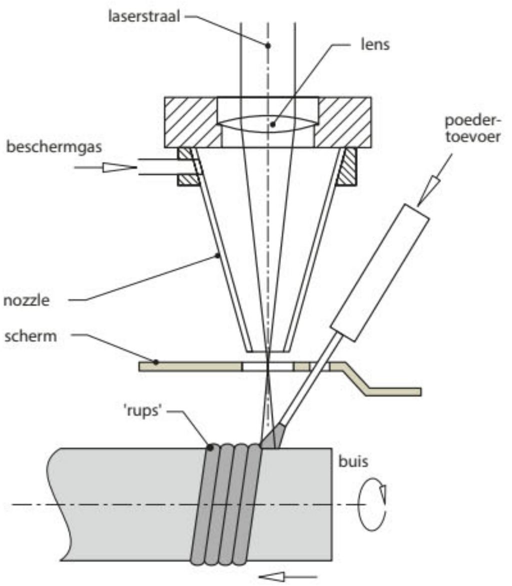
vervolgens als verf op het voorwerp aangebracht. In een oven wordt het email gebrand.
Allerlei anorganische materialen kunnen als email dienen. Daardoor zijn zeer uiteenlopende eigenschappen te realiseren op het gebied van duurzaamheid, kleur, glans en transparantie. Ook de wijze van opbrengen en de droog- en brandtemperaturen lopen nogal uiteen. Veel soorten email zijn goed bestand tegen hogere temperaturen en chemicaliën, en bovendien ook nog eens behoorlijk slagvast. Daarvan wordt gebruikgemaakt bij de productie van kookgerei, fornuizen, wasmachines en uitlaten van auto's.

Metaal en keramiek

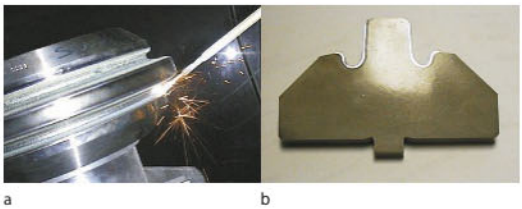
Cladden wordt gebruikt als verzamelbegrip voor een reeks technieken waarmee een dikkere laag (van circa 1 mm) van metaal of keramiek onder hoge temperatuur op een oppervlak wordt aangebracht. Is het op te brengen materiaal een metaal in de vorm van poeder of draad, dan spreekt men van **oplassen**. Het proces lijkt op booglassen (zie paragraaf 9.3.3). Er kunnen allerlei combinaties van basismetaal en oplasmetaal worden gebruikt. Zo kan een laag titaan op staalplaat worden gelast om die bestand te maken tegen corrosie door zeewater. Oplassen is ook een veelgebruikte techniek om een slijtagewerende laag aan te brengen op staal, bijvoorbeeld op rupsbanden. Zo nodig kan dit enige malen worden herhaald om versleten delen weer terug te brengen tot de oorspronkelijke vorm en afmetingen.
Een verfijnde uitvoering van cladden is **lasercladden**. Met een laser wordt hierbij poeder gesmolten, dat vervolgens op een metalen voorwerp wordt neergeslagen. Het te bedekken werkstuk wordt door middel van numerieke besturing gemanipuleerd. Relatief dunne lagen kunnen worden opgelast met zeer gelijkmatige eigenschappen. Figuur 10.5 toont schematisch de gebruikte installatie en figuur 10.6 geeft je een beeld van de verkregen resultaten. Figuur 10.7 toont een detail van een door lasercladden aangebrachte rups. Je ziet duidelijk de zone in het oorspronkelijke werkstukmateriaal die door de ingebrachte warmte is beïnvloed en de geringe inbranddiepte van het opgelaste materiaal.

Een andere vorm van cladden is het door middel van walsen aanbrengen van een dunne laag (van 0,05-0,1 mm) zuiver aluminium op plaatmateriaal van hoogwaardige, maar corrosiegevoelige aluminiumlegeringen. Het eindproduct dat wordt verkregen met dit proces staat bekend als Alclad. Dit materiaal wordt onder andere in de vliegtuigbouw toegepast.

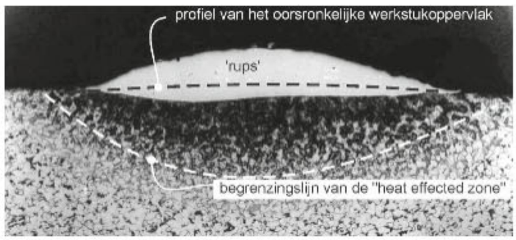
Een veelgebruikte methode om een zeer effectieve beschermingslaag op stalen voorwerpen aan te



Figuur 10.5 Installatie voor lasercladden



Figuur 10.6 Het opbrengen van een laag door lasercladden (a) en de doorsnede ervan na het slijpen (b) (NedClad)



Figuur 10.7 Doorsnede van een door middel van lasercladden opgebrachte 'rups' (Universiteit Twente, Toegepaste Lasertechnologie)

brengen is **verzinken**. Vroeger werd dit veel toegepast op huishoudelijke artikelen zoals wasteilen en emmers. Tegenwoordig wordt het voornamelijk toegepast op staalconstructies die jarenlang aan de buitenlucht worden blootgesteld, zoals vangrails langs autowegen en bovenleidingmasten voor spoor- en tramwegen. Meestal wordt de zinklaag aangebracht door het materiaal in een bad gevuld met vloeibaar zink te dompelen. Dit wordt **dompelverzinken** of **thermisch verzinken** genoemd. De op deze wijze aangebrachte zinklaag is vaak dikker dan de laag die wordt verkregen met de elektrolytische methode die we hierna beschrijven (0,03-0,20 mm tegenover 0,005-0,04 mm). Verder vindt thermisch verzinken plaats bij circa 450 °C en elektrolytisch verzinken bij circa 70 °C.

Bij het **elektrolytisch aanbrengen van deklagen** worden de te bekleden voorwerpen in een bad gehangen waarin een elektrolyt (een zout van het gewenste metaal) is opgelost. Het elektrolytisch aanbrengen van een zinklaag op staal wordt **galvaniseren** genoemd.
Een elektrode gemaakt van het gewenste metaal dient als anode (pluspool). Het te bedekken werkstuk dient als kathode (minpool). Deze situatie is dus tegengesteld aan die bij het elektrochemisch bewerken (zie paragraaf 6.2.3). Voorbeelden van lagen die op deze wijze worden aangebracht zijn koper, chroom, nikkel, cadmium en zink. De benodigde elektrische spanning is meestal niet meer dan 10 V. Bij grote installaties waarin gelijktijdig grote oppervlakten worden bedekt, zoals een reeks autobumpers, is een grote gelijkspanningsbron nodig met stroomsterkten ruim boven de 1000 A. De agressieve zouten veroorzaken veel schade aan het milieu en aan de installaties rondom de galvanische baden. Daarom is het gebruik van de elektrogalvanische methode sterk verminderd en zijn er vervangende galvanische processen ontwikkeld. Daartoe behoren onder andere de stroomloze natchemische methoden. Daarbij is geen externe stroombron nodig. In de elektrolyt bevindt zich een reductiemiddel. Een bijzondere toepassing van chemische metaaldeklagen is het aanbrengen van composietdeklagen. Hierbij worden in het metaal kleine deeltjes van een ander materiaal aangebracht, waardoor bijzondere eigenschappen kunnen worden verkregen.

Bij een recent onderzoek bleek dat een personenauto twee- tot drieduizend gegalvaniseerde onderdelen bevat, waaronder circa 15 kg gegalvaniseerde bouten. Ook printplaten worden door galvanotechnische processen vervaardigd. Een auto bevat ongeveer 1 m^2 aan printplaten, die ongeveer 20% van de waarde van de auto uitmaken. De eigenschappen van de langs galvanische weg verkregen deklagen lopen zeer uiteen. Deze eigenschappen hangen uiteraard af van het soort metaal en de dikte. Maar ook de eigenschappen van het basismateriaal, de oppervlaktegesteldheid, de reiniging en eventuele andere voorbehandelingen, en de wijze van aanbrengen zijn van groot belang. Soms kunnen de eigenschappen voor een bepaalde toepassing door een warmtebehandeling worden verbeterd. Zoals bij vrijwel alle processen die we in dit hoofdstuk bespreken, kunnen gespecialiseerde bedrijven in veel gevallen een doeltreffende oplossing bieden.

Een speciale toepassing van de elektro-galvanotechniek is het **elektroformeren**. Bij deze vormgevende techniek worden voorwerpen opgebouwd door metaal galvanisch neer te slaan op een basis, die later wordt verwijderd. Door de basis gedeeltelijk van een isolerende laag te voorzien kunnen folies met openingen ontstaan. Door de gevormde laag na enige tijd gedeeltelijk af te dekken, ontstaan wisselende laagdikten. Dit proces is in zekere zin het tegenovergestelde van chemisch frezen en foto-etsen (zie paragraaf 6.2.4). Elektroformeren wordt toegepast bij de vervaardiging van cd's, dvd's, elektronische componenten en de matrijzenfabricage voor auto-onderdelen.

Keramische deklagen of metaalpoeders worden opgebracht door deze in een pistool te verhitten met een gas-zuurstofvlam en deze op het oppervlak te spuiten. Dit noemt men **vlamspuiten**. Er bestaan veel varianten van. Bij het gebruik van een plasmabrander zijn temperaturen van meer dan 8000 °C mogelijk. Er kunnen veel verschillende materialen en laagdikten worden opgebracht met dit proces.

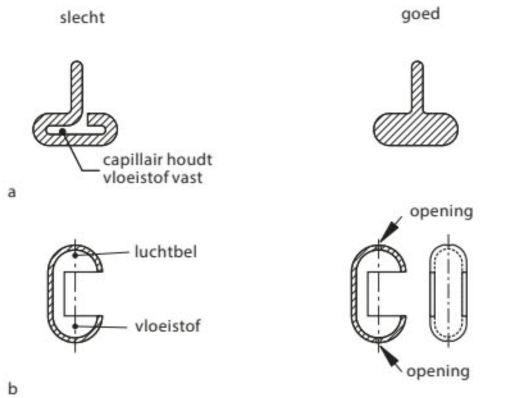
Na oplassen of vlamspuiten zal meestal een nabewerking zoals slijpen nodig zijn om de juiste vorm- en maattoleranties en ruwheid te bereiken. Hiervoor moet voldoende bewerkingstoegift aanwezig zijn (zie de richtlijnen in paragraaf 14.4.4).

Naast vlamspuiten is **opdampen in vacuüm** een belangrijke techniek voor het aanbrengen van keramische deklagen van enkele micrometers dik. Het bekendst zijn de slijtagewerende lagen op gereedschappen (zie paragraaf 5.4). Ook op niet-

verspanende gereedschappen en tal van andere aan slijtage onderworpen delen worden dergelijke lagen aangebracht. Afhankelijk van het basismateriaal en de toepassing kan uit veel verschillende deklagen worden gekozen. De technieken die worden gebruikt lopen nogal uiteen. De basis lijkt op die van het bewerken met ionen (zie paragraaf 6.4.4). Belangrijk is de gebruikte temperatuur. Sommige technieken werken bij temperaturen die hoger zijn dan de ontlaattemperatuur van staal en zijn daarom alleen geschikt voor materialen die tegen dergelijke hoge temperaturen bestand zijn, zoals hardmetaal en keramiek. Lenzen en spiegels worden op een soortgelijke manier van zeer dunne deklagen voorzien om hun optische eigenschappen te verbeteren. Op deze wijze kan een fraaie metaalglans worden verkregen, en daarom worden veel sieraden op deze vrij goedkope wijze van een goud- of andere metaalkleurige deklaag voorzien. Dat is zelfs mogelijk op kunststoffen. Men noemt dit ook wel Hong Kong goud.



Figuur 10.8 Een doorsnede toont de dunnere laagdikte bij scherpe randen



Figuur 10.9 Constructieve aanwijzingen voor voorwerpen die voorzien moeten worden van een deklaag

Enkele algemene aspecten van bekleden

Bij voorwerpen die voorzien moeten worden van een oppervlaktelaag dienen alle vlakken goed toegankelijk te zijn. Bij alle deklagen moeten scherpe kanten zo veel mogelijk vermeden worden. Verf en andere deklagen hebben de neiging bij scherpe randen dunner te worden en daardoor minder bescherming te bieden (zie figuur 10.8).

Het insluiten van vloeistoffen is een risico bij bekleden. Hierdoor kan het coatingmateriaal een 'zakker' gaan vormen. Daarnaast moet men voorkomen dat er luchtbellen kunnen ontstaan, want daardoor wordt er plaatselijk geen goede deklaag gevormd. Figuur 10.9a laat zien hoe het insluiten van een vloeistof in een nauwe spleet kan worden vermeden. Figuur 10.9b toont hoe op eenvoudige wijze het achterblijven van resten coatingmateriaal en het ontstaan van luchtbellen kan worden voorkomen.

Tot slot willen we graag wat aandacht besteden aan het stadium van het voortbrengingsproces waarin een deklaag wordt aangebracht. In verreweg de meeste gevallen krijgen onderdelen de gewenste deklaag nadat de vormgeving voltooid is. Daarna volgt de montage. Het komt echter ook vaak voor dat de deklaag, meestal verf, pas wordt aangebracht nadat de montage voltooid is. Het bekendste voorbeeld hiervan is het spuiten van de compleet samengestelde carrosserie van een auto voordat alle overige componenten, zoals de aandrijving en het interieur, worden aangebracht. Complexe kapitaalgoederen zoals gereedschapswerktuigen worden meestal pas geschilderd nadat zij volledig zijn gemonteerd en beproefd.

Het kan echter ook anders. Steeds vaker wordt voor de fabricage van plaatdelen, zoals behuizingen van huishoudelijke apparaten, gebruikgemaakt van voorbeklede plaat. Bij de uitvoering van de plaatbewerkingen scheiden (ponsen en stansen) en omvormen (buigen en dieptrekken) moet voorkomen worden dat de deklaag wordt beschadigd. Dit vraagt om speciale uitvoeringen van deze bewerkingen, met speciale machines en gereedschappen. Een bijzondere vorm van bedekken is **bedrukken**. Deze techniek is belangrijk in de verpakkingsindustrie. Dagelijks worden bijvoorbeeld tientallen miljoenen blikjes voor bier en frisdranken bedrukt met patronen in kleur, tegen zeer lage kosten.

10.5 Reinigen

Veel onderdelen moeten na de fabricage gereinigd worden voordat zij gereed zijn voor inspectie en montage. Soms is tussen opeenvolgende bewerkin-

gen **reiniging** nodig. Zo moeten resten van vormmateriaal die zijn achtergebleven na het gieten worden verwijderd. Hetzelfde geldt voor aangehechte slakken bij het lassen. Bij vrijwel alle oppervlakteveranderingstechnieken is een intensieve reiniging nodig om beschadiging van de oppervlakken te voorkomen en een goede hechting te verkrijgen. Ook verontreiniging van de gebruikte apparatuur moet worden voorkomen.

Er zijn veel verschillende reinigingstechnieken. Technieken die op een mechanisch principe berusten zijn schuren, slijpen, stralen en reinigen met borstels, doeken en dergelijke. De technieken oplossen, verzepen, emulsiferen, dispersie en aggregatie werken volgens een chemisch principe (zie figuur 10.10). Bij het reinigen wordt vaak een van de volgende reinigingsvloeistoffen gebruikt: koud of heet water, alkalische oplossingen, emulgeerders, oplosmiddelen, hete stoom en chemische middelen (zuren, zouten of organische mengsels). Elk van deze vloeistoffen is op zich in staat bepaalde verontreinigingen te verwijderen. Soms worden meerdere reinigingstechnieken na elkaar ingezet.

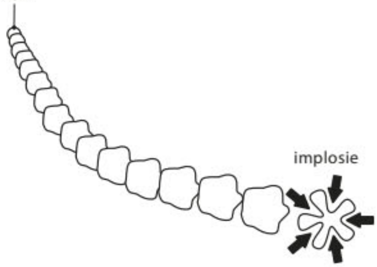
De reinigende werking van vloeistoffen kan worden versterkt door de toepassing van ultrasone trillingen (zie figuur 10.11). Hiertoe wordt meestal in het eerste bad een sonotrode geplaatst (zie paragraaf 6.3). De deeltjes die in het bad zweven veroorzaken implosies aan het te reinigen oppervlak, waardoor vuil wordt losgeslagen.

Een speciale vorm van reiniging is **beitsen**. Beitsen wordt gebruikt voor het verwijderen van vastzittende oxidehuiden op metalen, meestal door middel van een zuur. Het is een voorbehandeling voor het verven. Beitsen wordt tegenwoordig minder vaak toegepast vanwege de milieubelasting en de corrosieproblemen die worden veroorzaakt door het gebruik van zuren. **Etsen** is niet echt een reinigingsproces, maar we noemen het hier omdat het verwant is aan beitsen. Bij etsen worden verdunde chemicaliën gebruikt. Metalen oppervlakken worden er ruwer van, waardoor lijmen beter hechten.

De keuze van de reinigingsmethode hangt van veel factoren af, onder andere van het materiaal, de vorm, de afmetingen van de te reinigen werkstukken, het aantal te reinigen werkstukken, het soort verontreinigingen en het doel dat moet worden bereikt. Hoe vuil de werkstukken zijn,

Oplossen	Een stof (gas, vloeistof, vast) wordt gemengd met een vloeistof tot een helder mengsel.
Verzepen	Een chemische reactie waarin een esterverbinding gehydrolyseerd wordt met behulp van een base. Hierbij ontstaat een alcohol en een vetzuur.
Dispersie	Een systeem van gelijkmatig verdeelde fijne deeltjes in een medium.
Emulsie	Een mengsel van twee onoplosbare substanties.
Aggregatie	Samenklonteren.

Figuur 10.10 Enkele begrippen uit de reinigingstechniek



Figuur 10.11 Ultrasone trillingen in een reinigingsbad zorgen door implosies voor een intensieve reiniging

hangt meestal af van de voorgaande bewerkingen. In enkele gevallen zijn voor tussentijdse opslag of transport conserveringslagen aangebracht die samen met de verontreinigingen tijdens tussentijdse opslag en transport moeten worden verwijderd. Hoe schoon de werkstukken moeten worden, hangt af van welke behandeling volgt op de reiniging. In veel gevallen zijn enkele opeenvolgende stappen in het reinigingsproces nodig. Aanhangend vuil kan bijvoorbeeld eerst grof mechanisch worden verwijderd, en daarna kan olie en vet chemisch worden verwijderd. Daarna kunnen alle restanten van de reinigingsvloeistof door spoelen worden verwijderd. Als laatste stap van een reinigingscyclus kan een conserveringslaag worden aangebracht. Die laag voorkomt dat er opnieuw verontreiniging plaatsvindt. Ook kan er een conditioneringsbehandeling plaatsvinden. Deze behandeling bereidt oppervlakken voor op het aanbrengen van een deklaag, zoals verf. Een voorbeeld van een dergelijke voorbehandeling is het aanbrengen van een **conversielaag**. Dat is een goed hechtende, niet-geleidende anorganische laag, die in water niet of nauwelijks oplost. Een conversielaag wordt verkregen door een chemische reactie van het metaaloppervlak met een vloeistof.

Afhankelijk van de reinigingsmethode kunnen allerlei machines of installaties worden toegepast om veelvoorkomende reinigingswerkzaamheden sneller en effectiever te laten verlopen. Het gaat daarbij om het beperken van lichamelijke arbeid en het vermijden van schadelijke milieueffecten.

10.6 Conditionering ten behoeve van bewerkingsprocessen

Sommige bewerkingen verlopen beter als het materiaal beter aan de bewerking is aangepast. Ook hier maken we weer onderscheid tussen bulk- en oppervlaktebehandelingen.

10.6.1 Bulkbehandelingen

Vaak blijkt dat de maximale rek die een materiaal in een bewerking kan ondergaan, te gering is om de gewenste eindvorm te bereiken. Om dit op te lossen kan men een tussentijdse warmtebehandeling toepassen: een van de gloeibehandelingen uit paragraaf 10.2.1 (herstelgloeien, uitgloeien of homogeengloeien). In het geval van Al-legeringen kan hetzelfde worden bereikt met oplosgloeien en afschrikken (zie paragraaf 10.3). Deze behandelingen worden toegepast om de vervormingsmogelijkheden van een materiaal te vergroten. Gloeien verlaagt de vloeispanning, terwijl de breekrek in meer of mindere mate de oorspronkelijke waarde van voor de deformatie kan bereiken. Door uitgloeien krijgt zowel de vloeispanning als de breekrek zijn oorspronkelijke waarde.

De vraag wanneer een dergelijke warmtebehandeling moet worden toegepast (dat wil zeggen bij welke deformatiegraad), kan het beste beantwoord worden aan de hand van de grensvervormingskromme (zie paragraaf 2.3.4) en/of het ductiliteitsdiagram (zie paragraaf 2.3.5). Als plastische instabiliteit dreigt op te treden, geeft de grensvervormingskromme de maximaal toelaatbare rekken weer. De ductiliteitsgrens in het ductiliteitsdiagram geeft de vervormingsmogelijkheden van een materiaal weer als functie van de spanningstoestand.
Indien de warmtebehandeling vlak voor het bereiken van de ductiliteitsgrens wordt uitgevoerd, resulteert dit niet meer in het gewenste effect. Dit komt doordat vóór het bereiken van deze grens de initiatie tot breuk al heeft plaatsgevonden. Daarom moet de warmtebehandeling op veilige afstand van deze grens worden uitgevoerd. Indien men het effect van de warmtebehandeling wil nagaan, moet het materiaal aan een deformatie onderworpen worden bij een spanningstoestand identiek aan de spanningstoestand die het materiaal later in het proces zal ondergaan. Tegen deze laatste regel wordt in de praktijk vaak gezondigd. Zo kan het voorkomen dat een warmtebehandeling in een proef voldoet, maar in de uiteindelijke fabricage niet tot het gewenste effect leidt.

Voor het verspanen kan het juist gewenst zijn de vervormingsmogelijkheden te verkleinen, omdat de spanen dan sneller zullen breken. Dit vergemakkelijkt de spaanafvoer. Dit is te bereiken door het materiaal bij kamertemperatuur een grote voordeformatie te laten ondergaan.

10.6.2 Oppervlaktebehandelingen

In de fabricage worden zowel oppervlakken van werkstukken als oppervlakken van gereedschappen behandeld om de wrijving tussen gereedschap en werkstuk te verminderen. In veel gevallen gaat het hierbij om het aanbrengen van **smeermiddelen**. Figuur 10.12 geeft een overzicht van de toepassing van een aantal vaste smeermiddelen met hun typische gebruikstemperatuur.

Een andere oppervlaktebehandeling die vaak in de omvormtechnologie gebruikt wordt (bijvoorbeeld bij extrusie), is het aanbrengen van een **fosfaatlaag**. Deze laag bestaat uit zink-ijzer-fosfaat of uit mangaan-ijzer-fosfaat. Deze wordt niet alleen als vast smeermiddel en als smeermiddeldrager gebruikt, maar ook als corrosiewerende laag en als hechtlaag voor lak. De temperatuur van het omvormproces wordt bij het toepassen van een dergelijke laag beperkt tot 300 °C. Een ander bekend voorbeeld is het aanbrengen van een messinglaag op staaldraad. Dit noemen we **metalliseren**. Het wordt in de autobandenindustrie toegepast om het draadtrekken te vergemakkelijken, waarna de messinglaag als hechtlaag voor de rubber fungeert. Ook bij het dieptrekken worden dergelijke lagen af en toe gebruikt.
Een heel ander voorbeeld van een oppervlaktebehandeling voor procesconditionering wordt toegepast bij het lasersnijden. Sommige plaatmaterialen worden daarbij bedekt met een dunne laag die de lichtenergie beter absorbeert dan de plaat zelf.

Vast smeermiddel (met binder)	Opbrengtemperatuur (ºC)	Maximale gebruikstemperatuur (ºC)	Toepassingen: Aluminium-legeringen	Titanium-legeringen	Laagelegeerde staalsoorten	Chroom-stalen	Nikkel- en Cobalt-legeringen
Molybdeen-disulfide (epoxyhars)	150	200	x	x	x	x	x
PTFE	200	260	x	x	x	x	x
Molybdeen-disulfide (epoxy-siliconenhars)	200	450		x	x	x	x
Molybdeen-disulfide (butyltitanaat)	20	500		x	x	x	x
Grafiet (epoxy-siliconenhars)	200	500		x	x	x	x
Grafiet (glas	150	600			x	x	x
Boriumnitride (glas)	150	800			x	x	x

Figuur 10.12 Vaste smeermiddelen en hun toepassingsgebied

10.7 Milieueffecten

Traditionele warmtebehandelingen, oppervlakteveranderingstechnieken en reinigingsprocessen verbruikten veel energie en veel chemicaliën met schadelijke gevolgen voor de lucht en het oppervlaktewater. Dat is nu niet meer aanvaardbaar. Men heeft het verbruik van energie en schadelijke chemicaliën van deze technieken aanzienlijk weten terug te dringen. Bij verven, lakken en reinigen werden koolwaterstoffen op grote schaal vervangen door water als oplosmiddel. Er werden nieuwe technieken ontwikkeld. Zo zijn galvanische bewerkingen als verchromen en vernikkelen vervangen door minder schadelijke processen.
Oppervlaktebehandelingen kunnen een positieve bijdrage aan het milieu leveren indien zij bijdragen aan minder energieverbruik en een langere levensduur van producten.

10.8 Uitvoering van warmte- en oppervlaktebehandelingen

De ontwerper is verantwoordelijk voor de keuze van het materiaal in combinatie met een bijbehorende warmtebehandeling en/of oppervlaktebehandeling. Daarbij dient hij te letten op de functie van het onderdeel. Hoe deze behandelingen worden uitgevoerd, is echter ook van belang.
Veel productiebedrijven zijn in staat hun warmte- en oppervlaktebehandelingen grotendeels zelf uit te voeren. Dat betreft vooral massafabricage (zie paragraaf 15.2). Denk bijvoorbeeld aan de uitgebreide lakstraten in de auto-industrie, waar de carrosserieën eerst worden gereinigd, gedompeld voor het aanbrengen van grondlagen en vervolgens in een van tevoren bepaalde volgorde door robots in een gewenste kleur worden gespoten en ten slotte in een lange doorvoeroven worden gedroogd. In de kleinseriefabricage gelden heel andere omstandigheden. Daar kan vaak beter gebruik worden gemaakt van kennis en installaties die aanwezig zijn bij gespecialiseerde bedrijven.
Door toenemende kwaliteitseisen aan producten ontstaan nieuwe technieken, die soms gepatenteerd zijn en die veel nieuwe kennis en hoogwaardige installaties vereisen. Daarbij komen nog de voortschrijdende automatisering en de wet- en regelgeving op gebieden als arbeidsomstandigheden, veiligheid en milieu. De benodigde investeringen worden steeds hoger. Het handhaven van de voorschriften is belangrijk. Waar nodig moet men beschermende kleding en andere middelen voor persoonlijke bescherming dragen. Er mogen alleen goedgekeurde apparaten, middelen en methoden worden gebruikt. Werkgevers en werknemers zijn verantwoordelijk voor de naleving van de voorschriften en de overheid houdt daar toezicht op. Veiligheidsvoorschriften dienen goed zichtbaar te zijn in de werkruimte en moeten worden afgedrukt op verpakkingen (zie figuur 10.13).

Ook bij warmte- en oppervlaktebehandelingen is kwaliteitsbeheersing van belang. De methoden voor de beheersing van de productgeometrie (zie hoofdstuk 12) kunnen hier echter nauwelijks toegepast worden. Er is wel speciale apparatuur voor het meten van laagdikten. Verder kan eigenlijk alleen de hardheid worden gemeten. De overige onderzoeksmethoden zijn allemaal destructief. Procescondities zoals oventemperatuur en verblijftijd kunnen wel zorgvuldig worden beheerst. Indien de eigenschap-



Figuur 10.13 Het is verplicht om op verpakkingen van chemicaliën (bijvoorbeeld verf of lijm) met pictogrammen de gevarenklasse aan te geven

pen van het uitgangsmateriaal van elkaar verschillen, geeft dit echter nog geen zekerheid dat het resultaat binnen de gegeven toleranties ligt. Voor reinigen en andere oppervlaktebehandelingen zijn geen objectieve meetmethoden beschikbaar. Daar blijft visuele controle dus van belang. Restanten van aangehecht vuil, kale plekken, putten en krassen, verschillen in kleur en glans kunnen visueel goed worden opgespoord. Ook op dit gebied bestaan er methoden om aan te geven welke afwijkingen nog toelaatbaar zijn en welke niet. Men gebruikt daarbij monsters met toelaatbare fouten. Veel keuringsmethoden zijn vastgelegd in ISO-normen en zijn dus internationaal toepasbaar. In aanvulling daarop bestaan er nationale normen en normen van gespecialiseerde instanties, zoals van de Vereniging ION (Industrieel Oppervlaktebehandelend Nederland), voorheen bekend als de Vereniging Oppervlaktetechnieken van Materialen (VOM), en de American Society for Testing and Materials (ASTM).

Samenvatting

De technieken die we in dit hoofdstuk hebben behandeld richten zich op het veranderen van eigenschappen van werkstukmaterialen met het doel deze (beter) geschikt te maken voor de functie van het uiteindelijke product of voor de uitvoering van de nog volgende bewerkingen.

De behandeling kan gericht zijn op de volle doorsnede van het werkstukmateriaal, het bulkmateriaal, of op een dunne laag aan het oppervlak van het werkstuk.

Voor het veranderen van de eigenschappen van het bulkmateriaal zijn de warmtebehandelingen van metalen het belangrijkst. Voor ijzerlegeringen zijn dat spanningsarm gloeien, uitgloeien, homogeen gloeien, harden en veredelen. Voor aluminiumlegeringen zijn dat zachtgloeien, oplosgloeien en afschrikken, en precipitatieharden.

Bij de behandeling van oppervlakken gaat het om de verandering van de oppervlaktegesteldheid, vooral de ruwheid, of van de eigenschappen van de oppervlaktelaag. Voor dit laatste maken we onderscheid tussen conditioneren, converteren en bekleden. Los daarvan hebben we aandacht besteed aan het reinigen van werkstukken.

Voor de uitvoering zijn mechanische, chemische, fysische en elektrochemische processen beschikbaar. Milieueisen maken het ontwikkelen van nieuwe processen noodzakelijk.

De aard en de omvang van de installaties hangen af van de aard van het proces, de afmetingen van de producten, de seriegrootten en de gewenste automatiseringsgraad. Voor elk proces moet de ontwerper in overleg met de uitvoerder de specificaties van de resultaten van de behandeling met de toegestane toleranties vaststellen, evenals de wijze van controle.

Door het grote aantal alternatieven is er veel kennis en ervaring nodig om een geschikte combinatie van materiaal, warmtebehandeling en/of oppervlaktebehandeling te kiezen. De technieken die we in dit hoofdstuk hebben behandeld vormen een belangrijk bestanddeel van de fabricagemethode en mogen bij het ontwerpen van onderdelen niet buiten beschouwing blijven.

Literatuur

10.1 Kalpakjian S., Schmid S.R., *Manufacturing Engineering and Technology*, 7th SI edition, Pearson, 2014, ISBN 978-981-06-9406-7. Hoofdstuk 4 'Metal alloys: Their structure and strengthening by heat treatment'; hoofdstuk 26 'Abrasive machining and finishing operations'; hoofdstuk 34 'Surface treatments, coatings and cleaning'.

10.2 Groover M.P., *Principles of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems*, 5th SI edition, Wiley, 2013, ISBN 978-1-118-47420-4. Hoofdstuk 23 'Heat treatment of metals'; hoofdstuk 24 'Surface processing operations'.

10.3 Callister W.D., Rethwisch D.G., *Materials Science and Engineering: an Introduction*, 9th SI edition, Wiley, 2014, ISBN 978-1-118-31992-2.

10.4 Budinski K.G., Budinski M.R., bewerking Wei W., *Materiaalkunde*, 9de editie, Pearson Benelux, 2014, ISBN 978-9-043-02613-0. Hoofdstuk 13 'Warmtebehandelingen van staal'; hoofdstuk 21 'Oppervlaktebehandelingen'.

10.5 Czerwinski F., *Heat Treatment - Conventional and Novel Applications*, 1st edition, InTech, 2012, ISBN 978-953-51-0768-2.

10.6 Totten G.E., *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies*, 2nd edition, CRC Press, 2006, ISBN 978-084-93-8455-4.

10.7 *Handboek Galvanotechniek*, NGO-SBG Zoetermeer, 2013, ISBN 978-90-821575-0-5.

10.8 Cartier M., *Handbook of Surface Treatment and Coatings*, 1st edition, Wiley, 2003, ISBN 978-1-86058-375-9.

10.9 Makhlouf A.S.H., *Handbook of Smart Coatings for Materials Protection*, 1st edition, Elsevier Science & Technology, 2014, ISBN 978-085-70-9680-7.

Oefenvragen

10.1 Vergelijk de voor- en nadelen van de volgende productiescenario's:
- Een onderdeel in zijn geheel uit een hoogwaardig materiaal maken.
- Een onderdeel uit een minder hoogwaardig materiaal maken, gevolgd door een warmtebehandeling van het bulkmateriaal.
- Een onderdeel uit een minder hoogwaardig materiaal maken, gevolgd door een verbetering van de eigenschappen van de oppervlaktelaag.
- Een onderdeel uit een minder hoogwaardig materiaal maken, gevolgd door het opbrengen van een laag met betere eigenschappen.

10.2 Bij het gieten van relatief grote gietijzeren gietstukken kunnen aanzienlijke krimpspanningen ontstaan. Welke nabehandeling zou je in dit geval kunnen aanbevelen? Omschrijf deze behandeling in het kort.

10.3 Welke soort materialen komt in aanmerking voor kogelstralen of burnishing? Welke soort materialen komt meer in aanmerking voor vlamharden?

10.4
- a Maak het verschil duidelijk tussen conditioneren en converteren.
- b Welke materiaalveranderingen worden er bij conditioneren nagestreefd? Noem enkele voorbeelden van conditioneerprocessen.
- c Welke materiaalveranderingen worden er bij converteren nagestreefd? Noem enkele voorbeelden van converteerprocessen.

10.5 Maak een vergelijking tussen inzetharden en nitreren. Noem drie overeenkomsten en drie verschillen tussen beide processen.

10.6 Waarin verschilt een onderdeel dat door en door gehard is van eenzelfde onderdeel dat alleen aan de oppervlakte is gehard? Kijk hierbij naar de eigenschappen van beide onderdelen.

10.7 Vergelijk het aanbrengen van een deklaag door middel van poedercoaten en het aanbrengen van een deklaag door middel van lakken. Bedenk vier voordelen van poedercoaten en twee nadelen.

10.8 Licht het elektrolyseproces toe, zoals dat bij galvaniseren plaatsvindt. Noem enkele nadelen van galvaniseren als gevolg van het elektrolyseproces in vergelijking met thermisch verzinken.

10.9 Noem twee processen die bijzonder geschikt zijn voor maat- en vormherstel van versleten onderdelen (die we in dit hoofdstuk hebben besproken). Noem de belangrijkste kenmerken van deze processen.

inclusief website!

Op www.industrieleproductie.nl vind je de antwoorden op deze vragen, maar ook extra studie- en oefenmateriaal, zoals video's en meer opgaven.

11 Monteren

In dit hoofdstuk behandelen we de uitvoering van de montage; de toegepaste verbindingstechnieken hebben we al besproken in hoofdstuk 9. We richten onze aandacht voornamelijk op de montage in de grootserie- en massafabricage van (elektro)mechanische producten.
Aan de orde komen de problematiek van de onderlinge passing van delen aan de hand van de historische ontwikkeling, het montageproces en de structuur van montagesystemen. Ten slotte plaatsen we enkele opmerkingen over de relatie tussen het productontwerp en de montage.

11.1 Ontwikkelingen in de montage

Monteren, of **assembleren**, is het samenbrengen van onderdelen tot een samengesteld geheel. Ook de handelingen die indirect te maken hebben met dit samenbrengen worden tot het monteren gerekend.

De montage van (elektro)mechanische producten is de laatste stap in het voortbrengingsproces in een productiebedrijf. Montage geschiedt voor een groot deel handmatig. Alleen in de massaproductie kan men spreken van verregaande automatisering. In sommige industrietakken, zoals in de elektronische industrie, is vaak ook de assemblage van minder grote series in belangrijke mate geautomatiseerd. Dit is mogelijk doordat hier de assemblage meer gestandaardiseerde processen kent. De loonkosten bij de montage kunnen variëren tussen de 50% en 75% van de totale loonkosten voor de vervaardiging van een product. Het is daarom belangrijk de montageprocessen te optimaliseren.

Aanvankelijk werd dit alleen gedaan door de montagehandelingen goed te bestuderen en te optimaliseren met behulp van uitgebreide tijdstudies. Pas later realiseerde men zich dat de feitelijke problemen niet zozeer bij de assemblage lagen, maar bij het productontwerp. Het is niet erg effectief om tijdstudies te doen naar de montage van een product dat niet zo ontworpen is dat het eenvoudig kan worden gemonteerd. De interesse voor het productontwerp ontstond rond 1970, toen er meer aandacht kwam voor de automatisering van de montage. Het bleek dat de meeste producten grondig herzien moesten worden alvorens ze met machines gemonteerd konden worden.

Van aanpassen naar passingen

In het begin van het industriële tijdperk werden tijdens het monteren onderdelen op elkaar passend gemaakt. Wanneer een onderdeel niet paste, werd een volgend wel passend onderdeel genomen of werd het onderdeel opnieuw bewerkt.

Aan het begin van de 19e eeuw kwam hier verandering in. In de wapenindustrie werd de eis gesteld dat onderdelen **uitwisselbaar** moesten zijn, zodat men op het slagveld de wapens eenvoudiger zou kunnen repareren. Dit werd gerealiseerd door een **moedermodel** van het product te maken, dat gezien werd als het ideale product. Van dit moedermodel werden productgebonden meetgereedschappen, kalibers, afgeleid. Deze kalibers dienden om de onderdelen tijdens de fabricage op maatnauwkeurigheid te controleren. (Zie ook paragraaf 12.5.4 voor kalibers.)

Het heeft tot het begin van de 20e eeuw geduurd voordat producttekeningen van maattoleranties werden voorzien. Tot die tijd werden op de producttekening alleen nominale maten vermeld. Toleranties geven de toegestane maatafwijkingen aan. De grootte van de toleranties kan door verschillende eisen worden bepaald. Ten eerste moeten de onderdelen hun functie kunnen vervullen in het uiteindelijke product. Verder kan de assembleerbaarheid van het onderdeel in het product worden gegarandeerd met behulp van toleranties. Uit het oogpunt van fabricagekosten moeten de toleranties zo ruim mogelijk zijn. De wijze van bematen (met tolerantievelden) is vastgelegd in ISO-normen (zie onder andere het eenheidsgatstelsel en eenheidsasstelsel in hoofdstuk 12).

Door het gebruik van maat-, vorm- en plaatstoleranties kan de uitwisselbaarheid worden gegarandeerd zonder dat men gebruik hoeft te maken van een moedermodel of kalibers. Een ander voordeel is dat fabriceren en monteren kunnen worden ontkoppeld. Indien nodig kunnen deze processen zelfs op verschillende locaties of in verschillende ondernemingen (toeleveranciers) plaatsvinden.

Men kan uitwisselbaarheid ook garanderen door te zorgen voor **instelbaarheid**. Een scharnierpunt kan bijvoorbeeld van sleufgaten worden voorzien om de afstand tussen twee scharnierpunten in te stellen. Bij de montage kan deze afstand dan worden aangepast zonder het product te bewerken.

Bij complexe vormen worden nog vaak kalibers gebruikt om het product te controleren. Het is aan te bevelen om de montagemal ook geschikt te maken als inspectiegereedschap. De montagemal bepaalt immers de vorm van het product. Het inspecteren kan bestaan uit meten, het bepalen van de gerealiseerde maat of uit een **goedkeur/afkeur-test**. Bij een dergelijke test wordt alleen aangegeven of het product binnen of buiten de gegeven tolerantiegrenzen valt (zie paragraaf 12.5.4).

Henry Ford maakte gebruik van het feit dat onderdelen niet meer tijdens de assemblage passend hoefden te worden gemaakt. Hij was de eerste die massaproductie van auto's wist te realiseren (2 miljoen auto's per jaar). *'In mass production there are no fitters,'* aldus Ford. De afmetingen van zijn onderdelen waren nauwkeurig genoeg om dit waar te maken.

11.2 Verschillende gezichten van de montage

Zoals we in paragraaf 1.3 reeds hebben vermeld, bestrijkt de industriële productie een grote variëteit aan producten. De samenstellende componenten hiervan worden gekenmerkt door grote verschillen in eigenschappen als vorm, afmetingen, massa, locaties en toleranties. Daarnaast worden er veel verschillende verbindingstechnieken (zie hoofdstuk 9) gebruikt en wisselt de omvang van totaalseries (aantallen). Door dit alles bestaan er grote verschillen in assemblagemethoden, technieken, hulpmiddelen en de inrichting van montagesystemen. Enkele voorbeelden van zeer verschillende montagesituaties zijn:

- De grotendeels handmatige montage zoals die voorkomt in de enkelstuks-, kleinseriefabricage van machines en gereedschapswerktuigen. Alle benodigde onderdelen worden hierbij naar een gegeven montageplek gevoerd.
- De seriematige montage van vliegtuigen, waarbij eerst in de (voor)montage modulen zoals de romp, de vleugels en de staart worden gemonteerd (deelassemblages). Deze modulen worden vervolgens op een aantal opeenvolgende montagestations samengebouwd tot een compleet vliegtuig.
- De grootseriemontage van personenauto's op een montagelijn. Deze montagelijn bestaat uit een groot aantal montagestations met overwegend handmontage.
- De massafabricage van scheerapparaten, of nog extremer, van halogeen- en led-bollampen. Deze is in hoge mate geautomatiseerd.

De montage van sommige soorten producten vereist speciale voorzieningen. Voorbeelden hiervan zijn:

- Bij zeer grote en zware constructies wordt hijsapparatuur gebruikt voor het aanvoeren én positioneren van de onderdelen ten opzichte van elkaar. Je vindt deze constructies bijvoorbeeld in de zware machinebouw en in de scheepsbouw.
- Bij zeer kleine, fragiele, onderdelen, die zeer nauwkeurig en/of snel ten opzichte van elkaar gepositioneerd moeten worden, is de mens niet in staat deze montagetaken goed uit te voeren. Men heeft hier speciaal voor dat doel geschikte hulpmiddelen nodig.
- In sommige productieomgevingen moeten fabricage- en montageprocessen plaatsvinden in ruimtes die in hoge mate stofvrij zijn (*clean rooms*). Denk bijvoorbeeld aan de chipindustrie.
- Heel aparte voorzieningen zijn doorgaans vereist voor montage op locatie bij de eindgebruiker. Dat is bijvoorbeeld het geval bij gebouwen, chemische installaties, energiecentrales en grote machines. Meestal betreft het hier eenmalige projecten waarbij een groot aantal toeleveranciers betrokken is.

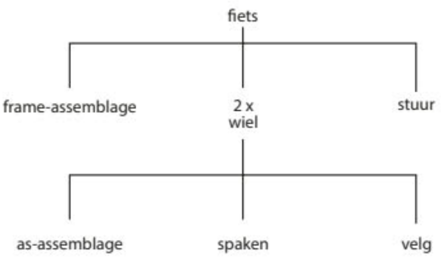
In dit hoofdstuk beschouwen we de montage van elkaar afwisselende productseries van (elektro-) mechanische producten.

11.3 Het montageproces

Voordat we in deze paragraaf het montageproces bespreken, is het van belang dat je begrijpt hoe het te monteren product is opgebouwd. Meestal wordt een product in meerdere **productvarianten** geproduceerd. Het totale productenpakket (al deze varianten samen) wordt de **productfamilie** genoemd. De **productstructuur** van het product geeft aan hoe het product is opgebouwd uit de verschillende onderdelen. Zie voor een sterk vereenvoudigd voorbeeld van een productstructuur figuur 11.1. Denk bijvoorbeeld ook aan een serie motoren met verschillende prestaties. De hoofdassemblage, de gehele motor, is daarbij opgebouwd uit deelassemblages en onderdelen. Een **deelassemblage** is een groep onderdelen die apart wordt gemonteerd, voordat deze in de hoofdassemblage wordt gemonteerd. Meestal vervult een deelassemblage een specifieke functie in het eindproduct. Bij een motor gaat het bijvoorbeeld om de dynamo of de carburateur.

Door een gunstige productstructuur kunnen standaard deelassemblages worden samengebouwd tot verschillende varianten binnen de productfamilie. Een gunstige productstructuur voldoet aan de volgende eisen:
- de productstructuur is modulair, dat wil zeggen opgebouwd uit verwisselbare standaardcomponenten;
- de samenstellende componenten kunnen afzonderlijk getest worden;
- het aantal verbindingen is minimaal;
- componenten die het eindproduct klantspecifiek maken (aangepast zijn aan de wensen van afzonderlijke klanten) worden het laatst gemonteerd.

Een voorbeeld van een product dat in hoge mate aan deze eisen voldoet is de computer. Deze wordt vaak bij aankoop aan de wensen van de klant aangepast.



Figuur 11.1 Vereenvoudigde productstructuur van een fiets

Handmatig of automatisch monteren

Verschillende factoren bepalen de mate waarin de montage van een product kan worden geautomatiseerd. De belangrijkste hiervan zijn:
- het ontwerp van het product: de constructie, de structuur en de robuustheid van het ontwerp (zie paragraaf 12.6.1);
- het productievolume: de seriegrootte per variant;
- het aantal varianten;
- de productlevenscyclus;
- de omvang en de moeilijkheidsgraad van de montagewerkzaamheden.

Het productievolume en het aantal varianten bepalen de hoeveelheid gelijke montagehandelingen. Alleen boven een bepaalde hoeveelheid gelijke montagehandelingen is automatiseren economisch gerechtvaardigd. Om complexe montagehandelingen geautomatiseerd uit te voeren, is namelijk vaak productspecifieke apparatuur nodig. De ontwikkeling van dergelijke apparatuur is duur en moet geheel kunnen worden afgeschreven gedurende de productlevenscyclus.

Montagehandelingen

Het monteren omvat een aantal opeenvolgende handelingen. Deze kunnen we onderverdelen in **primaire** en **secundaire montagehandelingen**.

Primaire montagehandelingen dragen direct bij tot de waardevermeerdering van het product. Secundaire montagehandelingen zijn alle overige handelingen die nodig zijn om het product te kunnen monteren. De verhouding tussen primaire en secundaire montagehandelingen geeft dus een indicatie van de doelgerichtheid en de efficiëntie van de montage.

Primaire montagehandelingen zijn:
- hanteren;
- verbinden;
- afstellen;
- inspecteren;
- testen.

Secundaire montagehandelingen zijn:
- opslaan;
- transporteren;
- reinigen;
- verpakken.

In deze paragraaf bespreken we enige belangrijke aspecten van de montagehandelingen. We houden daarbij de volgorde aan waarin de producten het montageproces doorlopen, vanaf de fabricage tot het verpakken: aanvoeren, hanteren, transporteren, verbinden, afstellen, inspecteren en testen. Daarna gaan we nog kort in op verpakken en montagemallen.

11.3.1 Aanvoeren van onderdelen

De te monteren onderdelen zijn afkomstig van toeleveranciers en de eigen fabricageafdelingen. De meeste bedrijven slaan ze eerst op in tussenmagazijnen, zodat ze er op tijd over kunnen beschikken. Van daaruit kunnen de onderdelen in de juiste hoeveelheden en op het juiste moment aan de assemblageafdeling worden geleverd. Het is uiteraard belangrijk dat de onderdelen niet beschadigen, verontreinigd raken of zoekraken.

Tegenwoordig streeft men ernaar precies op tijd te leveren. Dit wordt vaak aangeduid met de term *just-in-time* (JIT, zie hoofdstuk 15). Men probeert de kostbare opslag van wachtende voorraden en onnodig ruimtebeslag zo veel mogelijk te voorkomen. Stilstand van de montage door het ontbreken van onderdelen is echter ook zeer kostbaar. De beheersing van de logistiek is een van de belangrijkste aandachtsgebieden van de montage. Alles draait om het onbeschadigd aanvoeren van de juiste onderdelen op de juiste plaats op het juiste tijdstip.

Onderdelen moeten vóór het monteren in de juiste positie en oriëntatie worden gebracht. Hiervoor bestaan verschillende mogelijkheden. Grofweg bestaan er drie verschillende manieren van aanvoeren: ongeordende aanvoer, geordende aanvoer en halfgeordende aanvoer.

Ongeordende aanvoer

De onderdelen liggen los in bakken en worden er met de hand uitgenomen. De geometrie van het onderdeel moet hiervoor geschikt zijn. Zo is deze werkwijze niet bruikbaar wanneer de onderdelen in elkaar kunnen haken.

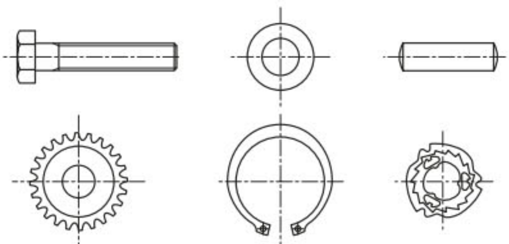
Bij **geautomatiseerde aanvoer** moeten de oriëntatie en de positie van het onderdeel iedere keer precies gelijk zijn. De **trilvuller** is hiervoor het meest toegepaste apparaat (zie figuur 11.2b). Dit is een bak die zodanig in trilling wordt gebracht dat de onderdelen door een gootje langs de wand van de bak omhoogklimmen. Door de vorm van de goot vallen de onderdelen die niet juist zijn georiënteerd terug in de bak. Ten slotte belanden de juist georiënteerde onderdelen in de aanvoergoot op de montageplaats.

Trilvullers zijn onderdeelspecifiek: voor ieder nieuw type onderdeel moet de goot opnieuw ontworpen worden. De kans op beschadiging van onderdelen en de kans op verkeerde aanvoer zijn aanzienlijk. Voor een succesvol automatiseringsproject in de assemblage is het beheersen van de aanvoer onontbeerlijk.

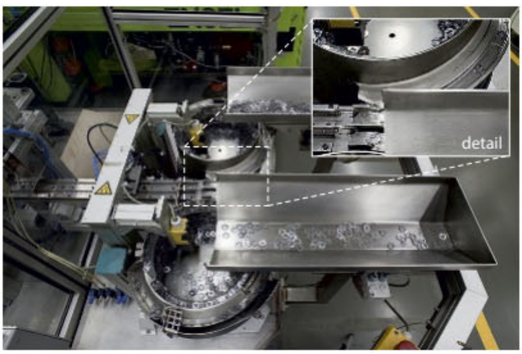
Geordende aanvoer

Het is veel efficiënter om de onderdelen geordend aan te voeren. Tijdens de fabricage ligt van ieder onderdeel de oriëntatie immers vast. Geordende aanvoer van onderdelen vereenvoudigt de montage, omdat oriënteren niet meer nodig is. Vooral bij geautomatiseerde montage kan dit grote kostenvoordelen opleveren.

Om onderdelen geordend aan te voeren kan men gebruikmaken van een **tray** of **rek**, een **band** of **tape** en een **gekoppeld fabricageproces**.



a



b

Figuur 11.2 Onderdelen (a) die geschikt zijn voor het aanvoeren en sorteren met behulp van een trilvuller (b) (Philips)

Tray of rek

Een tray is een bak met uitsparingen die ervoor zorgen dat de onderdelen op een vaste plaats en in de goede oriëntatie blijven liggen (zie bijvoorbeeld figuur 11.7).
Geponste delen worden geordend in rekken. Een eenvoudige oplossing voor vlakke delen is om ze aan pennen te rijgen.

Band of tape

De onderdelen worden op een drager geplakt en als rol aangevoerd. Elektrische componenten worden vaak op deze manier aangevoerd. Kleine geponste onderdelen zitten nog voor een deel vast aan het bandmateriaal, dat als onderdeeldrager fungeert (zie figuren 6.9 en 7.14). Hetzelfde principe is te gebruiken door spuitgietdelen niet los te snijden van de aanspuiting.

Gekoppeld fabricageproces

De fabricage van onderdelen wordt geïntegreerd in de montagelijn. Het kan een nadeel zijn dat de fabricage hierdoor verweven raakt met de assemblage. Het productiebedrijf wordt hierdoor minder overzichtelijk en minder flexibel.

Halfgeordende aanvoer

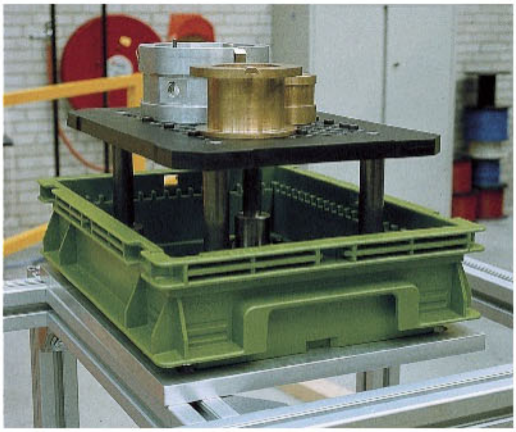
Het kan soms gunstiger zijn om onderdelen slechts gedeeltelijk te oriënteren en de uiteindelijke oriëntatie pas in de assemblagemachine te laten plaatsvinden. Dit kan kosten besparen bij de opslag en het transport naar de assemblage. Halfgeordende aanvoer kan worden gerealiseerd met een transportband en met een pallet of bak.

Transportband

Alle onderdelen liggen op hetzelfde steunvlak op de band. Door mechanische middelen of door waarneming met sensoren worden de positie en oriëntatie van de onderdelen op de band bepaald en indien nodig gecorrigeerd.

Pallet of bak

De onderdelen liggen los in een **pallet** of bak. Er zijn geen onderdeelspecifieke uitsparingen, waardoor de positie van de onderdelen nog niet volledig vastligt. In figuur 11.3 zie je een pallet waarvan de bodemplaat op tijdelijk omhoog geplaatste steunen rust, waardoor de onderdelen beter bereikbaar worden. De onderdelen worden met behulp van pennen gepositioneerd.



Figuur 11.3 Pallet met losse bodemplaat voor betere bereikbaarheid

11.3.2 Hanteren

Het **hanteren** van onderdelen is het oppakken en het oriënteren en positioneren van onderdelen. Voor het handmatig hanteren van onderdelen is een ongeordende aanvoer in de meeste gevallen aanvaardbaar. Van groot belang is de inrichting van de werkplek. Zie hiervoor paragraaf 11.4.2.

Geautomatiseerd hanteren vormt een veel groter probleem. Geordende aanvoer is dan absoluut noodzakelijk. De **grijper** van de assemblagemachine beweegt naar een positie waar het volgende onderdeel zich moet bevinden. Wanneer deze positie en ook de doelpositie steeds dezelfde zijn, kan voor een simpele industriële manipulator worden gekozen, een zogeheten **pick-and-place-eenheid** (zie ook hoofdstuk 13).

Is de positie variabel, bijvoorbeeld op een rek of tray, dan is het nodig een industriële robot toe te passen. Het monteren van een andere variant van een productfamilie is mogelijk door het uitvoeren van een ander robotprogramma. Bij wijzigingen aan het product kan de robot opnieuw geprogrammeerd worden. De **periferie** wordt gevormd door de overige apparatuur in het assemblagestation, zoals grijpers en aan- en afvoerapparatuur. De periferie is vaak minder flexibel en moet meestal gewijzigd of vervangen worden voor het assembleren van nieuwe producten.

De positioneeronnauwkeurigheid van een manipulator ligt tussen 0,1 en 2 mm. Voor het monte-

ren van sommige onderdelen is dit onvoldoende. Dit probleem is te verhelpen door de effector (zie paragraaf 13.9.2) te voorzien van **compliantie**, ofwel meegevendheid. Door compliantie bereikt het onderdeel tijdens de samenvoegbeweging onder invloed van de montagekrachten vanzelf de goede positie en oriëntatie. De vormgeving van het onderdeel moet hierop zijn afgestemd. Zo worden onderdelen die nauwkeurig moeten worden gepositioneerd, zoals pennen in gaten, van afschuiningen voorzien (zie figuur 16.9a).

Door onnauwkeurigheden in het assemblagestation kan de positioneernauwkeurigheid van het onderdeel ten opzichte van het product onacceptabel groot worden. In dat geval kunnen optische systemen worden gebruikt om de positioneernauwkeurigheid te verbeteren.

Wanneer met manipulatoren gehanteerd wordt, zijn grijpers nodig om de onderdelen op te pakken. Doorgaans worden hiervoor pneumatische grijpers met twee of drie vingers gebruikt. Om de onderdelen stevig te kunnen grijpen, worden de vingers vaak afgestemd op het betreffende product. Multifunctionele grijpers kunnen verschillende onderdelen grijpen. Meestal zijn er echter meerdere grijpers nodig om alle onderdelen te kunnen hanteren.

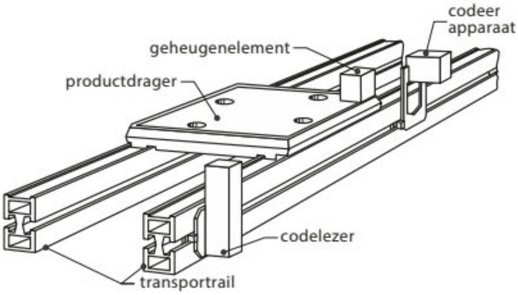
Onderdelen met hoge nauwkeurigheidseisen, zoals bijvoorbeeld in de aandrijving van harddisks voor computers, dienen met hoge nauwkeurigheid gepositioneerd te worden. De onderdelen worden voor montage stofvrij gemaakt door ze bijvoorbeeld te wassen, waarna ze in stofarme ruimtes worden gebracht. Dergelijke onderdelen kunnen het best direct na de fabricage vacuüm worden verpakt om ze schoon te houden en te beschermen tegen beschadiging. De onderdelen mogen niet met de hand worden aangeraakt; de dikte van een vingerafdruk, ca. 1 μm, kan al problemen veroorzaken.

Het hanteren van onderdelen met afmetingen van kleiner dan een millimeter (zie ook de micro- en nanotechnologie in paragraaf 1.1) brengt specifieke problemen met zich mee. Bij een dergelijk onderdeel kunnen de adhesiekrachten aanzienlijk zijn ten opzichte van de zwaartekracht. Dit heeft te maken met schaalwetten: de zwaartekracht schaalt met het volume van objecten, terwijl adhesiekrachten overwegend met het oppervlak van objecten schalen. Op een bepaald punt worden de adhesiekrachten groter dan de zwaartekracht. De overgang ligt rond de 1 mm. Dit is afhankelijk van een aantal voorwaarden, waaronder de materiaalsoort van het object en de omgevingscondities.
Dit fenomeen speelt een rol bij het oppakken en loslaten van een onderdeel. Bij het oppakken kan het onderdeel ‘wegspringen’ van de grijper, of op een onbedoelde positie in de grijper terechtkomen. Bij het loslaten van het onderdeel kan het onderdeel naar een onbedoelde positie ‘springen’ op het doeloppervlak, of zelfs aan de grijper blijven hangen. Deze fenomenen spelen in de macrowereld geen rol, maar in de microwereld kunnen ze het nauwkeurig positioneren van onderdelen aanzienlijk bemoeilijken.
De **adhesiekrachten** die dit fenomeen veroorzaken zijn de oppervlaktespanning, de elektrostatische krachten en de Van der Waals-krachten. Oppervlaktespanning treedt op door de aanwezigheid van een vloeistoffilm. In een niet-geconditioneerde omgeving is de oppervlaktespanning veelal dominant ten opzichte van andere adhesiekrachten. Hoewel adhesiekrachten in het algemeen verstorend zijn, kan men er ook gebruik van maken. Zo is het mogelijk kleine onderdelen te hanteren op basis van oppervlaktespanning. De vloeistoffilm die zich tussen de grijper en het onderdeel bevindt, biedt een ‘zachte’ interface. Dit kan voordelen opleveren als er kwetsbare onderdelen gehanteerd moeten worden.

11.3.3 Transporteren binnen het montagesysteem

Naast het transport van de onderdelen naar het assemblagesysteem, moet de hoofdassemblage vaak tussentijds getransporteerd worden van het ene assemblagestation naar het andere. Hiertoe wordt de hoofdassemblage op een productdrager geplaatst.

De **productdrager** ondersteunt de hoofdassemblage tijdens het transport tussen de stations. Daardoor blijft de hoofdassemblage in de goede oriëntatie, en kan deze op het volgende station weer nauwkeurig gepositioneerd worden. De productdrager dient soms tegelijkertijd als mal om onderdelen nauwkeurig ten opzichte van elkaar te positioneren. Verder moeten product en drager de krachten die tijdens de assemblage worden uitgeoefend, kunnen weerstaan. Men probeert meestal één onderdeel van het product zo te ontwerpen dat het op een



Figuur 11.4 Productdrager op transportrail; iedere drager heeft een geheugenelement, dat met codeer- en decodeerapparaten kan worden gebruikt

standaard productdrager geplaatst kan worden en dat de meeste andere onderdelen van het product erop gemonteerd kunnen worden. Dat onderdeel noemen we het **basisdeel**. Het basisdeel vervult veel van de functies van een productdrager en voorkomt dat er productspecifieke productdragers nodig zijn. Omdat er bij grote productieaantallen veel dragers nodig zijn en de nauwkeurigheid en de stijfheid hoog moeten zijn, vormen productdragers een grote kostenpost.

In figuur 11.4 is een productdrager weergegeven, nog zonder productspecifieke elementen. Iedere drager kan een hoeveelheid elektronische informatie bevatten, zodat verschillende varianten eenvoudig door elkaar kunnen worden getransporteerd zonder dat er extra logistieke problemen ontstaan.

11.3.4 Verbinden

De onderdelen kunnen op verschillende manieren met het product worden verbonden. In hoofdstuk 9 hebben we al de verbindingstechnieken besproken.

Een veelvoorkomende verbinding is de schroefverbinding. Het grote voordeel van een schroefverbinding is dat de onderdelen eenvoudig te demonteren zijn. Voor de assemblage is de schroefverbinding echter een nadeel, want daardoor moeten er meer onderdelen worden gemonteerd. Wanneer de onderdelen uit één geheel gemaakt kunnen worden, of de onderdelen zo geconstrueerd zijn dat er geen extra verbindingselement (zoals een schroef) nodig is, zijn er minder montagehandelingen nodig. Kiest de ontwerper toch voor een schroefverbinding, dan dient hij ervoor te zorgen dat alle schroeven van hetzelfde type zijn en dat ze in dezelfde richting worden aangebracht, bij voorkeur verticaal.

De klikverbinding is in de montage zeer populair. Het samenvoegen van de onderdelen kan met een eenvoudige beweging die vaak goed automatiseerbaar is. De losneembaarheid van de klikverbinding is echter afhankelijk van het ontwerp (zie figuur 9.40).

11.3.5 Afstellen, inspecteren, testen

Het inspecteren van onderdelen op maatnauwkeurigheid bespreken we in hoofdstuk 12. Inspecteren gebeurt meestal direct na de fabricage, zodat alleen goede onderdelen worden vrijgegeven. Doordat tijdens assemblage onderdelen samenkomen, is de kans op een eindproduct met een fout onderdeel al snel erg groot. Wanneer 20 onderdelen geassembleerd worden en voor ieder van die onderdelen geldt dat 1 op de 100 onderdelen fout is, betekent dit 18% foute eindproducten.
Het percentage goede producten is te berekenen met:

$$(1-1/100)^{20} = 0{,}82$$

Dat is 82%. Het percentage foute producten is dus 18%.

Onderdelen kunnen tijdens het transport of de opslag beschadigen. Daarom worden de onderdelen soms opnieuw geïnspecteerd vóór het assembleren. Bij een goede kwaliteitsbeheersing hoort dit overigens niet nodig te zijn. Het bewaken van de montagehandelingen tijdens de assemblage zorgt ervoor dat fouten in een vroeg stadium worden gedetecteerd. Op deze manier wordt voorkomen dat een fout product alle stappen van het proces doorloopt. Na de assemblage wordt het gehele product nogmaals geïnspecteerd op assemblagefouten.

Op de meeste producten wordt een **functionele test** uitgevoerd. Een goed modulair ontwerp maakt het mogelijk de afzonderlijke modules te testen. Bij consumentenartikelen wordt goedkeuring vaak aangegeven met stempels of plakkers om de verkoopbaarheid te bevorderen.

Afstellen is het inregelen van het product, zodanig dat dit aan zijn functionele specificaties voldoet. Dit geschiedt meestal aan het einde van de assemblage. Afstellen dient mogelijk te zijn zonder het product

weer te moeten demonteren. Veel afstellingen kunnen worden vermeden door een nauwkeurige fabricage.

11.3.6 Verpakken

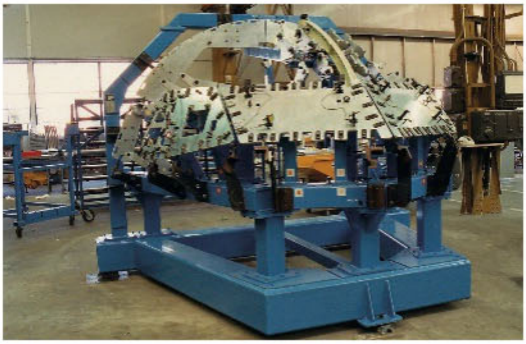
Nadat onderdelen zijn gemonteerd, zijn vaak nog extra handelingen nodig.
De laatste handeling in de montage is het **verpakken** van de eindproducten. De verpakking dient in de eerste plaats om het product te beschermen tijdens het transport. Op de verpakking wordt vaak met genormaliseerde tekens aangegeven hoe de eenheid behandeld moet worden. Denk hierbij aan informatie over de bewaartemperatuur, vochtigheid, stapelbaarheid, breekbaarheid enzovoort. Ook kan de verpakking de verkoopbaarheid bevorderen en informatie verschaffen over het product.

Aan de milieuvriendelijkheid van verpakkingsmateriaal wordt door wetgeving hoge eisen gesteld. Zo mogen producten niet meer zonder noodzaak dubbel of in niet te scheiden materialen verpakt worden. Verder mogen bepaalde materialen slechts beperkt als verpakkingsmateriaal gebruikt worden. Dit geldt onder meer voor aluminium.

11.3.7 Montagemallen

In dit hoofdstuk richten we ons hoofdzakelijk op het monteren van betrekkelijk kleine producten in grote series en in massa, zoals bijvoorbeeld het scheerapparaat. De nauwkeurigheid en vormvastheid van de onderdelen zijn hierbij groot. De onderlinge positie van de delen wordt meestal bepaald door centreerranden of pen-gatverbindingen. Hierdoor zijn er geen vormbepalende gereedschappen nodig, afgezien van de productdrager. Bij grotere producten als personenauto's en vliegtuigen zijn de onderdelen minder vormvast en vaak ook minder nauwkeurig. Daarbij is het nodig de onderdelen ten opzichte van elkaar te positioneren met behulp van **montagemallen** of **samenbouwmallen**.

In figuur 11.5 zie je een voorbeeld van een samenbouwmal voor de bovenzijde van het rompvoorstuk van een vliegtuig, de zogenoemde 'canopy'. De delen van de mal die zich op de plaats van de cockpitramen bevinden, zijn nauwkeurige modellen van de ramen. Door de raamsponningen samen te bouwen rondom deze modellen wordt ervoor gezorgd dat de ramen uitwisselbaar zijn. Deze delen van de mal dienen dus als kaliber (zie paragraaf 11.1). Ook bij lasconstructies worden vaak **lasmallen** toegepast, vooral wanneer deze in serie worden gefabriceerd. Ze worden bijvoorbeeld gebruikt bij het opbouwen van autocarrosserieën.



Figuur 11.5 Samenbouwmal voor de 'canopy' van een vliegtuig

11.4 De montageafdeling

In deze paragraaf zoomen we in op de montageafdeling. We kijken allereerst naar algemene structuren van montagesystemen en naar de werkplek voor handmatig monteren. Daarna richten we ons op de flexibilisering, inrichting en modulaire opbouw van de assemblage. We bespreken ook hoe montageprocessen kunnen worden geanalyseerd. We sluiten deze paragraaf af met een bespreking van het inleereffect.

11.4.1 Structuur van het montagesysteem

De structuur van een montagesysteem hangt samen met de mate van automatisering, het productievolume en de aard van het product. De montage kan plaatsvinden op een enkel station of op meer stations. De montage op meer stations kan parallel of sequentieel plaatsvinden. Bij sequentiële montage maken we nog onderscheid naar de wijze van transport.

Sequentiële montage met meer stations met:
- continu transport;
- synchroon intermitterend transport;
- asynchroon intermitterend transport.

Montage op een enkel station

Montage op een enkel station wordt toegepast zolang de benodigde montagetijd korter is dan het

gevraagde **afleveringsinterval** ofwel **cyclustijd**, de (gemiddelde) montagetijd die verloopt tussen het afleveren van twee producten.

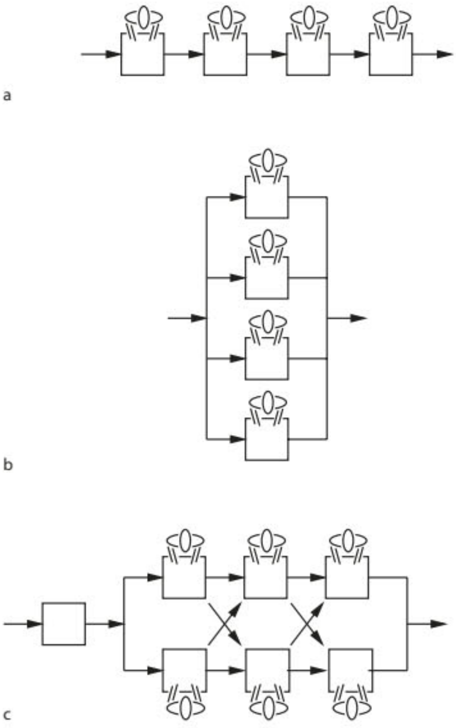
Montage op meer stations

Complexere producten vereisen soms langere montagetijden dan het afleveringsinterval. Bijvoorbeeld omdat ze uit grote aantallen componenten bestaan. Dan zijn er meerdere assemblagestations nodig. De assemblage op meerdere stations kan parallel of sequentieel worden uitgevoerd (zie figuur 11.6).

Parallel of sequentieel monteren

Door meerdere werkplekken naast elkaar te plaatsen, kan een groter productievolume worden verwerkt. Bij parallel monteren voert iedere montagemedewerker alle assemblagehandelingen uit.

Vaak is het echter niet mogelijk alle assemblagetaken op één werkplek uit te voeren. Bijvoorbeeld doordat er veel verschillende onderdelen en hulpmiddelen nodig zijn, die niet allemaal binnen handbereik kunnen worden geplaatst. Specifieke bewerkingen, zoals lassen of lijmen, moeten bovendien soms op verschillende plaatsen worden uitgevoerd. De assemblagetaken kunnen dan worden opgesplitst en verdeeld over opeenvolgende werkplekken. Dit noemen we sequentieel monteren. De hoofdassemblages worden op productdragers tussen de werkplekken getransporteerd. Per werkplek hoeven minder handelingen verricht te worden. Bij geautomatiseerde assemblage wordt zo voorkomen dat de stations te uitgebreid worden en daardoor storingsgevoelig. Bij handmatige assemblage raken de montagemedewerkers sneller gespecialiseerd in de door hen te verrichten handelingen. Dit zijn redenen waarom de keuze veelal op sequentiële montage valt in plaats van op parallelle montage.



Figuur 11.6 Verschillende montageopstellingen: sequentieel (a), parallel (b) en hybride (c)

Afhankelijk van de cyclustijd kan sequentiële montage leiden tot een geestdodende, zeer beperkte taakinhoud, met als gevolg een geringe betrokkenheid bij het werk, ziekteverzuim en personeelsverloop. Denk hierbij ook aan Charlie Chaplins film *Modern Times* (we noemden deze film ook al in hoofdstuk 1).

Ook bestaan er combinaties van parallelle en sequentiële montage. Dit zijn hybride opstellingen (zie figuur 11.6c).

Laten we veronderstellen dat een product uit vier subassemblages wordt samengebouwd in een sequentiële montagelijn (zie figuur 11.6a). De totaal benodigde montagetijd is dan

$$t_{totaal} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_{eind}$$

waarbij t_{eind} de tijd is voor de laatste stap waarin het eindproduct tot stand komt.
Wanneer de montagehandelingen parallel aan elkaar kunnen worden uitgevoerd (zoals in figuur 11.6b), zal de totale montagetijd afnemen:

$$t_{totaal} = t_{langste} + t_{eind}$$

waarbij $t_{langste}$ de tijd is die nodig is bij het station met de langste assemblagetijd.

Het transport bij sequentiële montage

Bij sequentiële montage moeten productdragers worden getransporteerd tussen de werkplekken. Dit kan op verschillende manieren plaatsvinden: continu, synchroon intermitterend en asynchroon intermitterend.

Continu

Bij een **continu montagesysteem** bevinden de productdragers zich op een transportband die ononderbroken en gelijkmatig langs de stations beweegt. Er worden bewerkingen uitgevoerd op het bewegende product. De gereedschappen en de montagemedewerkers moeten dus met het product meebewegen en daarna snel terugkeren naar het volgende product. Continue handmatige lijnen worden wel toegepast bij de eindassemblage van auto's en andere grote producten.

Synchroon intermitterend

Bij **synchroon intermitterend** transport staat de productdrager een vaste periode stil, terwijl de assemblagehandelingen worden verricht. Na deze periode bewegen alle productdragers naar het volgende station. De tijd die nodig is voor transport kan dus niet benut worden voor assemblage. Een nadeel van zowel de continue als de synchroon intermitterende methode is dat op elk station evenveel tijd beschikbaar is om handelingen te verrichten. Het assemblagestation met de langste cyclustijd is daardoor maatgevend voor de cyclustijd van het gehele systeem. Dit houdt ook in dat alle andere stations op een lager tempo werken dan mogelijk is. Het kan daarom gunstig zijn om het station met de langste cyclustijd dubbel uit te voeren, waardoor de gemiddelde cyclustijd van deze handeling wordt gehalveerd. Het optimaal verdelen van het te verrichten werk over een aantal werkplekken wordt **line-balancing** genoemd.

Een nadeel van een synchrone lijn is het feit dat de hele lijn stopt wanneer er een storing optreedt in een van de stations. Ook wanneer elk station bijvoorbeeld 98% van de tijd beschikbaar is, loopt de storingskans voor de hele lijn alsnog zeer snel op. De beschikbaarheid van de lijn bedraagt dan $0{,}98^n$, waarbij n het aantal stations voorstelt. Dit aantal wordt daarom begrensd tot maximaal 20. De beschikbaarheid van de lijn is dan slechts $0{,}98^{20} = 0{,}67$. De lijn is dus gedurende 1/3 van de bedrijfstijd gestagneerd!

Synchroon intermitterende lijnen zijn meestal sterk gemechaniseerd en weinig flexibel. Ze worden daarom toegepast voor grote series kleine producten, waarbij korte cyclustijden gerealiseerd kunnen worden. Denk bijvoorbeeld aan halogeen- en led-bollampen. De haalbare capaciteit is enkele duizenden producten per uur.

Asynchroon intermitterend

Bij **asynchroon intermitterend** transport worden de productdragers tussen de stations in **buffers** geplaatst. Hierdoor is de assemblage niet aan een vaste cyclustijd gebonden. Wel moet de gemiddelde cyclustijd van ieder station gelijk zijn. Buffers maken de lijn beter geschikt voor handmatige assemblage.

Een asynchroon intermitterende lijn is minder gevoelig voor storingen dan een synchroon intermitterende lijn. Wanneer in een station een fout optreedt, kan de rest van de lijn namelijk nog een beperkte tijd doordraaien. De buffer voor het station met een fout loopt daarbij langzaam vol, de buffer na het station loopt leeg.

Bij asynchrone lijnen kunnen meer stations worden toegepast dan bij synchrone lijnen. Ze worden voornamelijk gebruikt bij langere cyclustijden. De capaciteit ligt in de orde van 100-1000 producten per uur.

11.4.2 Werkplek voor handmatig monteren

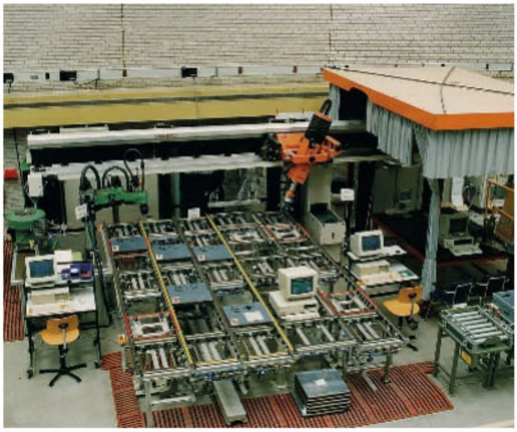
Voor zittend handmatig monteren is het vooral van belang dat de onderdelen eenvoudig uit de aanvoerplaats te pakken zijn en dat de afstand tot de hoofdassemblage zo kort mogelijk is. De werkplekken zijn hier volledig op ingericht. Soms worden draaibare schijven met bakken naast de werkplek gezet, zodat de montagemedewerker de benodigde bakken naar zich toe kan draaien.

In verband met een goede werkhouding moet het product zich op de juiste plaats bevinden ten opzichte van de medewerker en eenvoudig afgevoerd kunnen worden. Ten slotte dienen de gereedschappen gemakkelijk bediend te kunnen worden. Soldeerpistolen en luchtgedreven schroevendraaiers hangen daarom aan hefbomen met gewichtscompensatie of aan veren boven het werkgebied. In figuur 11.7 is een handmatige werkplek afgebeeld die deel uitmaakt van de montagelijn van de Philips-scheerapparaten.

De kwaliteit van de werkomgeving speelt ook een belangrijke rol. De prestaties van een montagemedewerker zijn onder andere afhankelijk van omstandigheden als verlichting, luchtvochtigheid, temperatuur en het geluidsniveau. Dit noemt men het **fysisch arbeidsklimaat.** Er wordt veel onder-



Figuur 11.7 Handmatige werkplek voor de montage van de behuizing van de Philips-scheerapparaten



Figuur 11.8 Experimentele opstelling van een assemblagesysteem

zoek verricht naar werkomstandigheden. Dit soort onderzoek maakt deel uit van de **ergonomie**, het vakgebied dat de interactie tussen de mens, zijn gereedschap en de werkomgeving bestudeert.

Verder werken mensen beter wanneer zij tussen collega's zitten dan wanneer zij afgezonderd zijn van de rest. Bovendien kunnen problemen ten aanzien van kwaliteit en productiviteit vaak worden opgelost in onderling overleg tussen collega's. Men spreekt in dat verband van het **sociaal arbeidsklimaat**.

Veel aspecten die te maken hebben met arbeidsomstandigheden zijn tegenwoordig onderworpen aan wettelijke regels.

11.4.3 Flexibel geautomatiseerd assemblagestation

De term 'flexibel' is hier misleidend, want in vergelijking met een geautomatiseerd station is de mens veel flexibeler. Om het voordeel van automatisering ook voor kleinere series producten rendabel te maken, moet de machine echter zeer flexibel zijn in het omstellen naar een ander product.

Een **flexibel assemblagestation** is opgebouwd uit een industriële robot, effectoren en periferie. De periferie wordt meestal door de robotbesturing aangestuurd. We hebben eerder in dit hoofdstuk al enige aspecten besproken van het flexibel aanvoeren en hanteren van onderdelen. Een flexibel assemblagestation moet geschikt zijn om kleine series varianten binnen een productfamilie te kunnen assembleren. De nadruk ligt op het snel kunnen omstellen naar een bestaande variant in de familie. De **omsteltijd** dient in dezelfde orde van grootte als de cyclustijd te liggen. Het toevoegen van een nieuwe variant aan de familie moet mogelijk zijn zonder de configuratie van het station te veranderen.

Een dergelijk flexibel station is alleen toe te passen als de producten speciaal ontworpen worden voor assemblage met het aanwezige systeem. Dit is bijvoorbeeld in hoge mate gerealiseerd bij het plaatsen van onderdelen op printplaten, volgens de *surface mount technology*. De elektrische componenten zijn zo ontworpen dat ze eenvoudig op de printplaat kunnen worden gepositioneerd. Vervolgens worden ze op een volgend station gesoldeerd.

Figuur 11.8 geeft een hybride opstelling van twee flexibele assemblagestations weer, een handmatig station en een laad/los-station. De pallets kunnen worden gebufferd en in willekeurige volgorde langs de stations worden getransporteerd. Op de pallets bevinden zich zowel de te monteren onderdelen als de productdragers.

11.4.4 Inrichting van sequentiële montagesystemen

Sequentiële montagesystemen kunnen op verschillende manieren worden ingericht: als assemblagelijn, als carrousel of als indexeertafel.

Bij een **assemblagelijn** zijn de stations in een rechte lijn of in een U-vorm geplaatst. De productdragers

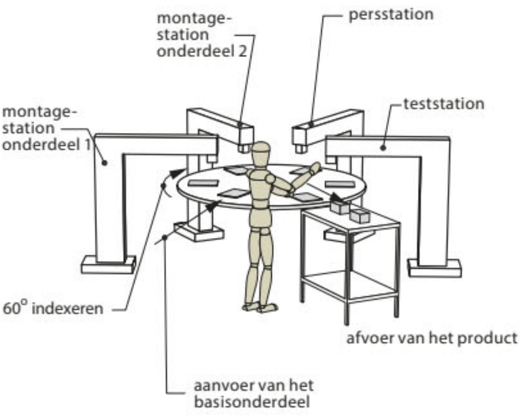
moeten leeg weer naar het begin van de lijn worden getransporteerd als ze het einde van de lijn hebben bereikt. Doordat de stations achter elkaar liggen, is er genoeg ruimte voor apparatuur en personeel. De werkstukken kunnen variëren van klein tot groot. Het ruimtebeslag is ongunstig, vooral voor de rechte lijn. Er kunnen terugvoerlijnen worden ingebouwd om foute producten opnieuw te behandelen.

Bij een **carrousel** grenst het laatste station aan het eerste, zodat de werkstukdragers direct weer gebruikt kunnen worden.

De **indexeertafel** wordt veelvuldig toegepast in synchroon intermitterende assemblagesystemen. De productdragers bevinden zich hierbij op een stapsgewijs draaiende tafel. De stations zijn opgesteld rondom de tafel (zie figuur 11.9). Door de afmetingen van de ronde tafel is slechts een beperkt aantal stations mogelijk, maximaal circa 12. Het ruimtebeslag is echter gunstig. Onderhoud verrichten is vaak moeilijk, omdat de stations moeilijk toegankelijk zijn voor reparatie. De typische productiecapaciteit ligt rond 1 product per seconde.

11.4.5 Modulaire opbouw van assemblagelijnen

Onder **modulaire opbouw** wordt het opbouwen van een samengesteld systeem met behulp van standaardelementen verstaan. Hier gaat het dus om een montagelijn. De elementen in het systeem functioneren zo veel mogelijk zelfstandig, doordat ze voorzien zijn van bijvoorbeeld eigen aandrijvingen,



Figuur 11.9 Een indexeertafel voor twee assemblagehandelingen, een pershandeling en het testen van het product

besturingen, en energievoorziening. De ombouwflexibiliteit van een modulaire assemblagelijn is groot. Daardoor kunnen de ontwerp- en fabricagekosten voor nieuwe lijnen worden gereduceerd en kan de ontwikkeltijd worden verkort. Verder is de betrouwbaarheid groter en het onderhoud eenvoudiger. Bij aanpassingen kunnen modules gemakkelijk worden toegevoegd of uitgewisseld. Bij het invoeren van nieuwe producten kunnen bestaande modules opnieuw worden gebruikt.

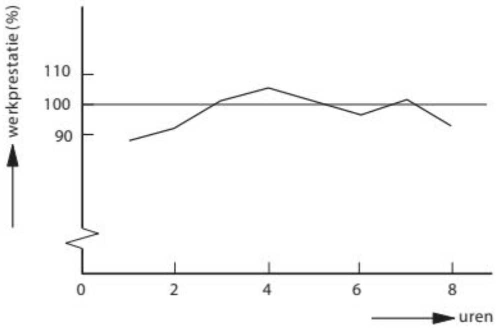
11.4.6 Procesanalyse

Bij de analyse van montageprocessen worden de taken per station in elementaire handelingen opgesplitst. Voor deze handelingen zijn standaardtijden, **normtijden**, bekend. (Zie voor een verdere analyse de paragrafen 16.3.2 en 16.4.1). Door alle normtijden bij elkaar op te tellen kan de totale assemblagetijd worden berekend, de **taaktijd**. Deze analyse brengt een aantal belangrijke zaken aan het licht.

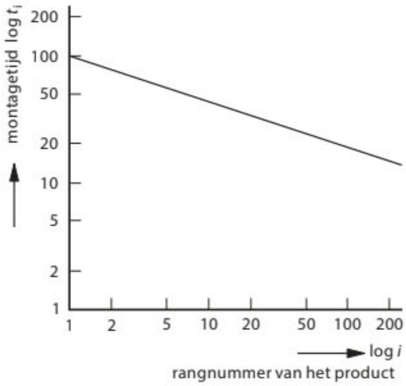
De schatting van assemblagetijden kan gebruikt worden om bij benadering de capaciteit van de assemblageafdeling te berekenen, zodat deze beter kan worden bestuurd. Ook kan vooraf berekend worden hoeveel tijd er nodig is voor de assemblage van een geheel product, zodat leveringstermijnen beter kunnen worden nagekomen.
Een belangrijk aspect is dat een montagemedewerker geen constante prestatie levert; het prestatieniveau varieert bijvoorbeeld over de werkdag (zie figuur 11.10). Hier moet men rekening mee houden. Men moet regelmatig controleren of de normtijden nog overeenstemmen met de werkelijkheid. In sommige bedrijven worden de normtijden gebruikt om hogere productiviteit extra te kunnen belonen.

Door de opeenvolging van handelingen nauwkeurig te analyseren, kunnen overbodige handelingen worden geïdentificeerd. Zo kan het voorkomen dat op de ene werkplek een deksel wordt gemonteerd, terwijl deze op een andere werkplek weer moet worden gedemonteerd om een ander onderdeel te kunnen monteren of een afstelling uit te voeren.

Veel inspectiehandelingen zijn bedoeld om zekerheid te krijgen over de juistheid van de uitvoering van eerder verrichte handelingen, of om te verifiëren of de aangeleverde onderdelen foutloos zijn. Door iedereen verantwoordelijk te stellen voor de kwaliteit van zijn eigen werk kan tegen lagere kos-



Figuur 11.10 Werkprestatie van een assemblagemedewerker, gemeten over de loop van een werkdag [11.1]



Figuur 11.11 Inleercurve bij handmatige montage

ten een hogere kwaliteit worden bereikt. De nadruk moet liggen op de kwaliteit van de uitvoering. Hierdoor wordt de kans op uitval sterk gereduceerd en is inspectie achteraf niet meer nodig.

11.4.7 Inleereffect

Bij seriefabricage treedt het **inleereffect** op. Dit houdt in dat bij een toenemend aantal producten de tijdsbesteding per product volgens een bepaalde wetmatigheid vermindert.

Deze wetmatigheid werd ontdekt bij de vliegtuigfabricage tijdens de Tweede Wereldoorlog en blijkt ook nu nog te gelden. De ervaring leerde destijds dat voor het tiende vliegtuig 80% van de manuren nodig was in vergelijking met het vijfde toestel. Dezelfde trend trad op bij het tweehonderdste toestel in vergelijking met het honderdste. Voor de planning van complexe of arbeidsintensieve processen maakt men nog altijd gebruik van dit verschijnsel, ook in de vliegtuigbouw. Het kan worden beschreven met de volgende formule:

$$t_i = t_1 \times i^n$$

t_1 = tijdsbesteding voor het eerste product,
i = rangnummer van het product,
t_i = tijdsbesteding voor product i,
n = exponent ($-1<n<0$).

De inleercurve vormt op dubbel-logaritmische schaal een rechte lijn (zie figuur 11.11).

Voor het geval dat voor het tiende vliegtuig 80% van de manuren nodig is in vergelijking met het vijfde toestel kunnen we de waarde van exponent n als volgt bepalen:

$$t_5 = t_1 \times 5^n$$
$$t_{10} = t_1 \times 10^n$$

Verder weten we dat

$$t_{10} = 0{,}8 \times t_5$$

Hieruit volgt de volgende berekening:

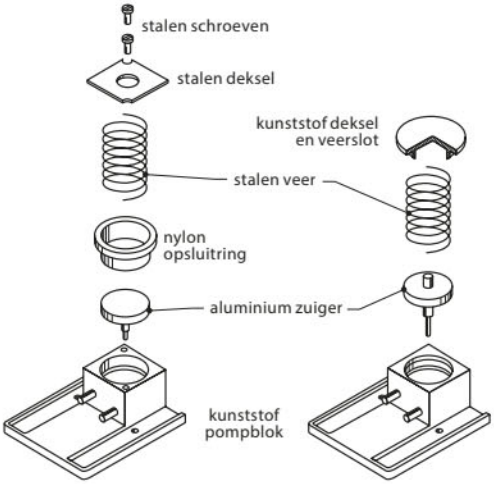
$$t_1 \times 10^n = 0{,}8 \times t_1 \times 5^n$$
$$10^n / 5^n = 0{,}8$$
$$2^n = 0{,}8$$
$$n \times \log 2 = \log 0{,}8$$
$$n = -0{,}323$$

Het inleereffect van 80% komt dus overeen met een waarde voor n van -0,323. De waarde van de exponent hangt samen met de samengesteldheid en de moeilijkheidsgraad van de taak. Het effect is sterker naarmate het assemblageproces meer samengesteld en minder machinegebonden is.

Bij het bepalen van de kosten van een product moet rekening worden gehouden met het inleereffect. Voor de proefserie en de eerste serie geeft men dan ook een toeslag op de taaktijden.

11.5 Montagegericht ontwerpen

Zoals we al meermaals in dit hoofdstuk hebben aangegeven, heeft het productontwerp grote invloed op de assemblage. De vorm van onderdelen heeft invloed op de hanteerbaarheid. Vooral wanneer men kiest voor geautomatiseerde assemblage is een assemblagegericht productontwerp een eerste vereiste.



Figuur 11.12 Herontwerp van een pompblok. Het aantal onderdelen is gereduceerd, terwijl de assemblagehandelingen voor de overgebleven onderdelen zijn vereenvoudigd [11.2]

De twee grondregels voor assemblagegericht ontwerpen zijn:
- reduceer het aantal onderdelen;
- vereenvoudig de assemblagehandelingen.

Het reduceren van het aantal onderdelen heeft tot gevolg dat er minder gemonteerd hoeft te worden. Men dient er daarnaast voor te zorgen dat het product zo eenvoudig mogelijk te assembleren is. Zo heeft het de voorkeur om alle inzetbewegingen in een rechte lijn van boven naar beneden uit te voeren. Door het aanbrengen van afschuiningen wordt het positioneren van de onderdelen gemakkelijker. Bij monteren met behulp van manipulatoren is dit onmisbaar.

Deze twee basisregels zijn terug te vinden in het vernieuwde ontwerp van een pompblok in figuur 11.12.

Ook de productstructuur heeft grote invloed op de montagevriendelijkheid van een product. In onze bespreking van de verschillende typen assemblagesystemen is de assemblagevolgorde nog niet ter sprake gekomen. De mogelijkheden voor het bereiken van gelijke cyclustijden per station, het line-balancing-probleem, hangt sterk af van de keuze van de assemblagevolgorde. Men moet ervoor zorgen dat per station zoveel onderdelen worden gemonteerd dat de taaktijd per station zo veel mogelijk gelijk is. De cyclustijd wordt uiteindelijk bepaald door de langste taaktijd in de lijn.
Wanneer een product uit verschillende deelassemblages bestaat, die los van elkaar gemonteerd kunnen worden voordat ze in de hoofdassemblage geplaatst worden, kunnen deze in zijtakken van de lijn worden geassembleerd.

In hoofdstuk 16 gaan we uitvoerig in op product- en productiegericht ontwerpen.

Samenvatting

Montage, of assemblage, is het samenbrengen van onderdelen zodat een samengesteld product ontstaat. De primaire montagehandelingen zijn het hanteren, verbinden, inspecteren, afstellen en testen van onderdelen. Het transporteren van onderdelen binnen en buiten het montagesysteem, het opslaan, reinigen en verpakken worden tot de secundaire handelingen gerekend.

De montage wordt nog steeds voornamelijk handmatig uitgevoerd. De mens is zeer flexibel in het hanteren van onderdelen. Het toepassen van flexibel geautomatiseerde assemblage is beperkt, mede doordat productontwerpen niet goed zijn afgestemd op de mogelijkheden van de assemblagemethoden. Flexibel geautomatiseerde assemblage is bestemd voor het afwisselend monteren in kleine series of slechts enkele stuks van verschillende varianten binnen een productfamilie.

Assemblagesystemen bestaan uit diverse assemblagestations waarlangs de producten op productdragers worden vervoerd. Het transport kan continu of intermitterend zijn. Een intermitterende beweging kan synchroon worden uitgevoerd, waarbij alle productdragers tegelijk naar het volgende station bewegen, of asynchroon, waarbij ieder station zelf bepaalt wanneer de volgende productdrager wordt verwerkt.

Door de assemblagehandelingen te analyseren is het mogelijk knelpunten vast te stellen, verbeteringen aan te brengen en nauwkeurige schattingen te maken van de assemblagetijden. Daarmee is het mogelijk de assemblagetijden in een lijn op elkaar af te stemmen en de totale tijd te verkorten.

Het productontwerp beïnvloedt in hoge mate de doelmatigheid van het assembleren.

Literatuur

11.1 Lotter B., Wiendahl H.-P., *Praxis der Montage in der industrielle Produktion*, 2012, Springer Verlag, ISBN 978-3-642-29061-9.

11.2 Boothroyd, G., Dewhurst, P., Knight, W., *Product Design for Manufacture and Assembly*, 3rd edition, 2010, CRC Press, ISBN 978-1-4200-8927-1.

11.3 Feldman, K., Schöppner, V., Spur, G., *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren*, 2013, Carl Hanser Verlag, ISBN 978-3-446-42827-0.

11.4 Nof, S.Y., Wilhelm, W.E., Warnecke, H., *Industrial Assembly*, 1997, Springer, ISBN 978-1-4613-7937-9.

11.5 Konold P., Reger H., *Praxis der Montagetechniek*, 2. Auflage, 2009, Vieweg Verlag, ISBN 978-3-528-13843-1.

11.6 Crowson, R., *Assembly Processes: Finishing, Packaging and Automation*, 2006, Taylor & Francis, ISBN 978-0849355653.

11.7 Speck, J.A., *Mechanical Fastening, Joining and Assembly*, 2017, CRC Press, ISBN 978-1138748408.

Oefenvragen

11.1 Beschrijf de invloed van de uitwisselbaarheid van componenten op het montageproces.

11.2 Geef een voorbeeld van de productstructuur van een samengesteld product naar keuze. Gebruik deze structuur voor het weergeven van een productfamilie.

11.3 Karakteriseer een gunstige productstructuur.

11.4 Wat wordt bedoeld met ongeordende aanvoer? Beschrijf een systeem om ongeordend aangevoerde onderdelen met de juiste oriëntatie op de montageplaats te brengen.

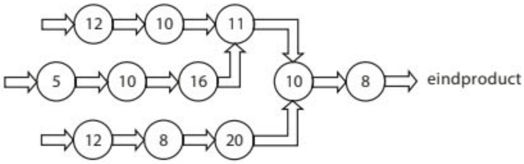
11.5 Stel dat een product gemonteerd wordt met behulp van 9 stations. Deze stations kunnen parallel of sequentieel geplaatst worden. Voor ieder station geldt een gemiddelde storingstijd van 4 minuten per uur. Bereken de gemiddelde beschikbaarheid in procenten voor beide assemblagesystemen.

11.6 Wat is het inleereffect? Omschrijf de wetmatigheid. Hoe verandert het inleereffect wanneer arbeidsintensieve processen worden geautomatiseerd?

11.7 Twee onderdelen moeten in massa worden gemonteerd. De volgende verbindingsmethoden worden overwogen: mechanisch klikken, lijmen en lassen. Noem de belangrijkste factoren die bij de keuze een rol spelen.

11.8 Het schema in de bijgaande figuur laat een assemblageproces zien. De symbolen (cirkels) vertegenwoordigen op elkaar volgende processtappen, het monteren van een onderdeel of een subassemblage. De getallen in ieder van de processtappen geven de tijdsduur van het proces in seconden weer.

a Hoeveel tijd neemt het monteren van een fabricageserie in beslag als er een order voor 10.000 stuks is geplaatst?



Figuur bij oefenvraag 11.8

b In het betreffende bedrijf bestaat een werkjaar uit 47 weken van 5 werkdagen per week en 7,5 uur effectief werken per dag. Hoeveel assemblagemedewerkers zijn er minimaal nodig om de jaarproductie van 125.000 stuks te kunnen monteren?

c Bij een jaarproductie van 90.000 stuks zijn twee assemblagemedewerkers voldoende. Welke processtappen zou je aan de afzonderlijke medewerkers toebedelen? Wat betekent deze splitsing van werkzaamheden voor de taakverdeling?

inclusief website!

Op www.industrieleproductie.nl vind je de antwoorden op deze vragen, maar ook extra studie- en oefenmateriaal, zoals video's en meer opgaven.

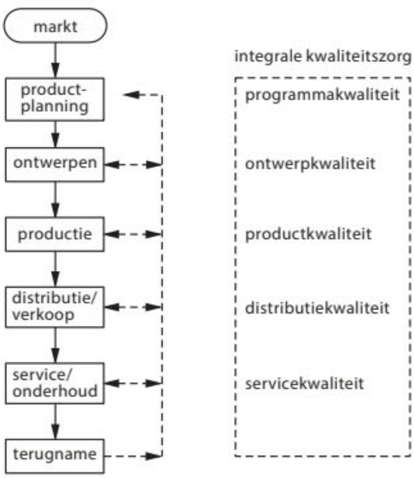
12 Kwaliteit

In dit hoofdstuk geven we een algemeen inzicht in de begrippen kwaliteit en totale of integrale kwaliteitsbeheersing.
We behandelen de begrippen productkwaliteit, kwaliteit van de organisatie en van de medewerkers, de kwaliteit van de fabricageprocessen en de belangrijkste normen voor certificering van organisaties en producten.
We geven informatie over het beoordelen van de productkwaliteit, met name van de functionele eigenschappen. Belangrijke aspecten hiervan zijn de geometrie (vorm, maat, oppervlaktegesteldheid) en de materiaaleigenschappen van de onderdelen.
We kijken onder andere naar geometrische meettechniek en niet-destructief materiaalonderzoek.

12.1 Inleiding

De **kwaliteit van een product** is de mate waarin een product bruikbaar is voor het gestelde doel ('*fitness for use*'). We kunnen dit ook wat breder formuleren als de mate waarin het geleverde product overeenkomt met de verwachtingen van de klant. Als een auto tegen minimale kosten vier personen moet kunnen vervoeren, is de kwaliteit van een Volkswagen hoger dan die van een Rolls-Royce. De kostprijs van het product maakt deel uit van de kwaliteit; de prijs/prestatie-verhouding van het product moet optimaal zijn.

De kwaliteit van een product wordt in de eerste plaats bepaald door de **kwaliteit van het ontwerp**. De ontwerpeisen moeten daarom in overeenstemming zijn met de wensen van de beoogde klantenkring. Het is de belangrijkste (marketing)taak van de verkooporganisatie om hiervoor te zorgen. Dergelijke eisen gelden overigens voor alle fasen van het bedrijfsproces (zie figuur 12.1).



Figuur 12.1 Kwaliteitscircuit

Hieruit blijkt dat de kwaliteit van het product het resultaat is van de **kwaliteit van de organisatie**. In dit verband spreekt men over **totale** of **integrale kwaliteitszorg** en **totale kwaliteitsbeheersing**.

Voorbeeld:

> De kwaliteit van de organisatie kan al blijken uit het eerste contact dat een klant met een bedrijf heeft. Een onderneming schreef voor dat doorgeschakelde telefoongesprekken na maximaal drie keer overgaan beantwoord moesten worden. Iedereen die regelmatig bedrijven of instellingen opbelt, kan bevestigen hoe irritant het is als een telefoon tijdens kantooruren niet redelijk snel wordt opgenomen. De vereiste verbetering bleek bij dit bedrijf haalbaar door het personeel te motiveren steeds te melden waar men bereikbaar was. Dit bespaarde de telefonisten zeer veel zoektijd.

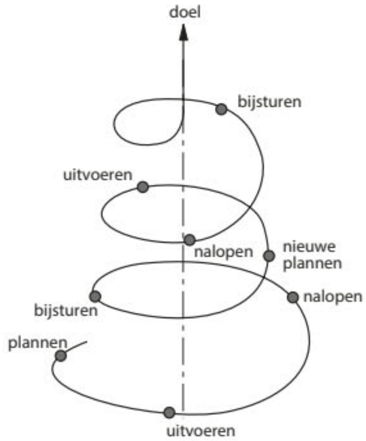
Een hoge kwaliteit kan men allereerst bereiken door ervoor te zorgen dat iedereen in de organisatie verantwoordelijk is voor de kwaliteit van zijn eigen werk. Dit kan alleen als elke medewerker weet welke eisen er aan hem worden gesteld en de mogelijkheid heeft om zijn eigen werk daaraan te toetsen. Daarom ziet de **kwaliteitsafdeling** erop toe dat in

alle stappen van de productie deze eisen eenduidig vastliggen, dat er procedures en werkmethoden zijn voor het opvolgen van de kwaliteit en dat de juiste informatie en hulpmiddelen hiervoor beschikbaar zijn. De kwaliteitsafdeling controleert bovendien of de procedures en werkmethoden worden uitgevoerd volgens de opgestelde regels. Dit laatste noemen we **kwaliteitsborging**.
Alle contacten binnen het bedrijf moeten worden beschouwd als een leverancier-klantrelatie. Elke leverancier is verantwoordelijk voor zijn product; elke klant moet optredende problemen rechtstreeks melden aan zijn leverancier.

Hoge nauwkeurigheid en kleine toleranties zijn op zichzelf geen maten voor de kwaliteit. Wanneer een product buiten de op de tekening vermelde toleranties valt maar in de praktijk wel blijkt te voldoen, is niet alleen het product fout, maar ook het ontwerp. Dat schrijft dan kennelijk te kleine toleranties voor. Een organisatie waarin een dergelijke fout kan ontstaan of waarin deze fout niet wordt hersteld, kan geen kwaliteit leveren. Om misverstanden te voorkomen: ook de fabricageafdeling die een product aflevert dat afwijkt van de ontwerpeisen handelt fout!

Wanneer de werkvoorbereiding of de fabricageafdeling vaststelt dat een voorgeschreven tolerantie alleen tegen hoge kosten haalbaar is, is het noodzakelijk terug te gaan naar de ontwerpafdeling om te onderzoeken of de gestelde eisen werkelijk nodig zijn. Dit behoort een standaardprocedure te zijn en niet af te hangen van persoonlijk initiatief of van toevallige persoonlijke relaties tussen de betreffende medewerkers. Dit houdt ook in dat de behandeling van klachten, zowel van interne als van externe klanten, een hoge prioriteit dient te krijgen. Klachten zijn een belangrijke bron van informatie voor de ontwerper.

Ook robuustheid is een belangrijk aspect van de kwaliteit van het ontwerp. Bij een **robuust ontwerp** kiest men de werkingsprincipes, structuur en geometrie slim. Hierdoor komen tijdens de productie van de onderdelen minder kritische bewerkingen en toleranties voor dan bij een vergelijkbaar ander ontwerp. Een robuust ontwerp elimineert niet de oorzaken van de spreiding in de fabricageprocessen van de afzonderlijke componenten, maar de gevolgen daarvan. Denk hierbij bijvoorbeeld aan een as met aan beide uiteinden een radiaal lager.



Figuur 12.2 Kwaliteitsspiraal

Wanneer de axiale opsluiting plaatsvindt aan een zijde van de as, kunnen de tolerantie op de lengte van de as en de thermische uitzettingen van de as of het huis het functioneren van de constructie niet verstoren.

Voorwaarden voor een goed kwaliteitsbeleid

Het realiseren van een goed kwaliteitsbeleid is een ingrijpend proces, voorzien van een groot aantal valkuilen. Het vergt dan ook veel aandacht en tijd. De volledige aandacht en steun van de hoogste leiding van het bedrijf is een absolute voorwaarde voor succes. De leiding moet vooral alle medewerkers bij de problematiek betrekken en hun kennis en inzicht optimaal benutten om het productieproces stap voor stap te verbeteren. We willen graag benadrukken dat het hier om een nooit eindigende kringloop gaat; er zullen steeds weer nieuwe problemen optreden en het kan altijd nog beter. Het einddoel is niet meer of minder dan het voorkómen van alle fouten (*'zero defects'*, *'first time right'*)! Dit streven wordt symbolisch voorgesteld door de **kwaliteitsspiraal** (zie figuur 12.2). Het leveren van producten die allemaal binnen de tolerantiegrenzen vallen, moet beschouwd worden als een minimumeis.

De motivatie van het gehele personeel om zich gezamenlijk voor kwaliteitsverbetering in te zetten is een belangrijke voorwaarde. Een bekende valkuil is het ondergraven van deze motivatie doordat de leiding zelf haar eigen richtlijnen overtreedt!

12.2 Kwaliteitscertificering

Er bestaan internationale normen voor het opzetten van een kwaliteitssysteem. In deze normen liggen de eisen vast waaraan het systeem moet voldoen, maar niet de manier waarop dit moet gebeuren. De belangrijkste normen hebben de volgende betekenis:

ISO 9000:
: Geeft de grondbeginselen van kwaliteitsmanagement en alle gebruikte definities.

ISO 9001:
: Bevat eisen voor een kwaliteitsmanagementsysteem waarmee de klantentevredenheid wordt verhoogd.

ISO 9004:
: Geeft richtlijnen voor continue verbetering van de algemene prestaties, doelmatigheid en doeltreffendheid van de organisatie. Bevat aanwijzingen voor het laten groeien van kwaliteitsmanagementsystemen naar business excellence.

ISO 10014:
: Geeft richtlijnen voor de realisatie van financiële en economische voordelen door investeringen in kwaliteitsmanagement.

NB Internationale normen (ISO), Europese normen (EN) en nationale normen (NEN) worden regelmatig geactualiseerd. Gebruik steeds de meest recente uitgave.

Het principe van deze ISO-normen is als volgt samen te vatten:
- alle procedures die invloed hebben op de kwaliteit moeten schriftelijk vastgelegd zijn;
- alle werkzaamheden moeten volgens de vastgelegde procedures worden uitgevoerd;
- alle handelingen, meetresultaten en dergelijke moeten worden geregistreerd en bijgehouden, zodat de kwaliteit ook achteraf aantoonbaar is.

Populair uitgedrukt: Kwaliteitszorg is zeggen wat je doet en (aantoonbaar) doen wat je zegt.

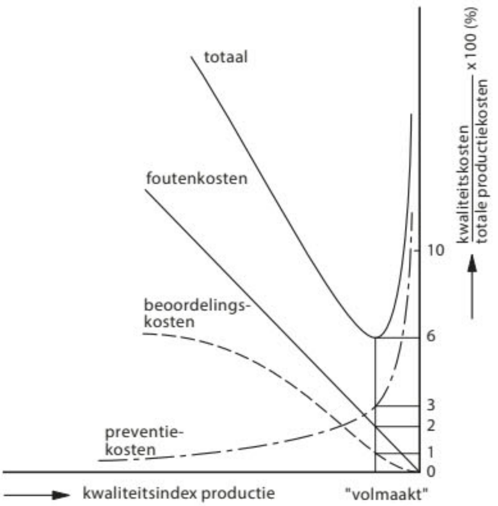
Een bedrijf kan een certificaat verwerven volgens de norm ISO 9001. Hiermee kan het bewijzen dat het aan de eisen uit de norm voldoet. Voor een afnemer biedt dit de garantie dat de leverancier een behoorlijk werkend kwaliteitssysteem heeft. Steeds meer afnemers stellen zo'n certificaat verplicht.

De certificering kan worden uitgevoerd door:
- Particuliere organisaties die gemachtigd zijn om certificaten te verstrekken. (Deze voeren de certificering vrijwel altijd uit indien het een certificaat conform ISO 9001 betreft.) In Nederland houdt de Raad voor Accreditatie toezicht op de certificerende instellingen; in België is dit BELAC. De nationale accreditatie-instellingen staan op hun beurt onder internationaal toezicht.
- De nationale overheid, in Nederland bijvoorbeeld de Rijksluchtvaartdienst. (Dit betreft uitsluitend bijzondere gevallen met een hoog veiligheidsrisico.)
- Particuliere afnemers. (Dit betreft vooral grote ondernemingen die hun toeleveranciers een eigen certificaat toekennen indien deze voldoen aan hun eisen.)

Voor diverse branches (bijvoorbeeld de auto-industrie, de luchtvaartindustrie, de gezondheidszorg, en overheidsinstellingen) zijn gespecialiseerde nationale of internationale normen ontstaan, waarin de principes van ISO 9001 verder zijn uitgewerkt. Deze uitgebreide normen stellen strikte eisen aan toeleverende bedrijven. In tegenstelling tot ISO 9001 stellen deze normen continue verbeteringsprocessen voor productkwaliteit, leverbetrouwbaarheid en fabricagekosten verplicht. Ook schenken ze aandacht aan de relaties tussen bedrijven in een fabricageketen.

Het bezit van een certificaat is een goed en vaak onmisbaar verkoopargument. Daarnaast kan het van groot belang zijn bij procedures op grond van de Wet **productaansprakelijkheid**. Wanneer een gebruiker schade ondervindt als gevolg van een tekortkoming van een product, is de leverancier daarvoor aansprakelijk. De bewijslast dat hem dit defect niet kan worden aangerekend ligt bij hem. Een aantoonbaar goed kwaliteitssysteem kan hierbij een doorslaggevende rol spelen.

Het verwerven van een certificaat is voor elke onderneming een kostbaar en tijdrovend project. Vaak neemt dit drie tot vijf jaar in beslag. De eigen werknemers moeten zeer veel werk verzetten, en daar komen de kosten van externe adviseurs en de certificerende instantie nog bij. Bovendien is een certificaat slechts 2-3 jaar geldig; de periodieke verlenging brengt opnieuw kosten met zich mee.



Figuur 12.3 Kwaliteitskosten als functie van de kwaliteitsindex

Daar staat tegenover dat een goed kwaliteitssysteem uiteindelijk kosten bespaart. In figuur 12.3 zie je dat de kosten voor inspectie en voor herstel en afkeur dalen naarmate men zich meer inspant voor preventie. Boven een bepaald niveau van preventieve inspanningen nemen de totale **kwaliteitskosten** weer toe. Onderzoek uitgevoerd bij een groot aantal bedrijven heeft echter aangetoond dat de werkelijke situatie bijna altijd links van het optimum ligt en dat dus op de totale kwaliteitskosten bespaard kan worden. Bovendien bleek uit dit onderzoek dat de kwaliteitskosten vrijwel altijd veel hoger lagen dan men dacht! Het vaststellen van de werkelijke kwaliteitskosten, en met name van de foutenkosten, is dan ook niet eenvoudig.
Realiseer je dat het bereiken van '**zero defects**' in principe dus niet tot minimale kwaliteitskosten leidt. In de praktijk helpt het streven naar dit doel wel het minimum dichter te benaderen.

12.3 De CE-markering

Sinds 1 januari 1995 moeten binnen de Europese Unie verschillende categorieën nieuw gefabriceerde artikelen voorzien zijn van de **CE-markering** (CE staat voor Conformité Européenne). Dit geldt onder andere voor alle productiemachines. De CE-markering heeft betrekking op eisen op het gebied van veiligheid, gezondheid en milieu.
Een CE-markering zegt in principe niets over de functionele kwaliteiten van een product. De eisen zijn vastgelegd in een stelsel van Europese normen (EN-normen). Er bestaan drie soorten normen. Alle artikelen moeten voldoen aan de algemene normen (A-normen). Deze zijn stapsgewijs nader uitgewerkt voor verschillende productgroepen, zoals bewerkingsmachines (B-normen) en specifieke subgroepen, zoals excenterpersen (C-normen).

In principe zijn fabrikanten bevoegd de CE-markering aan te brengen door te verklaren dat hun product (aantoonbaar) aan de normen voldoet. In voorgeschreven gevallen moet de CE-markering worden toegekend door een daartoe bevoegd verklaarde instantie, een '**notified body**'. Het bevoegd verklaren van een 'notified body' gebeurt in Nederland door de Raad voor de Accreditatie (Nederland) en in België door BELAC (zie paragraaf 12.2). Een belangrijke voorwaarde voor de toestemming voor het gebruik van de markering kan het bezit van een gecertificeerd kwaliteitssysteem zijn.

Europese normen worden ontwikkeld door de Europese normalisatie-instellingen. Hiervan zijn alle nationale normalisatie-instellingen van de EU-lidstaten lid. De nationale normalisatie-instellingen zijn verplicht EN-normen in hun normenbestand op te nemen. Dat is met ISO-normen niet het geval. De nationale overheden zijn verantwoordelijk voor de handhaving van normen waarnaar in overheidsvoorschriften verwezen wordt. Dat geldt dus onder andere voor de Europese normen die van belang zijn voor de vrije handel in goederen binnen de Europese Unie, waaronder de normen uit de CE-markering.

Een artikel voorzien van de CE-markering moet door alle EU-lidstaten worden geaccepteerd. Naast het verbeteren van de veiligheid en het verlagen van de milieubelasting is een doelstelling van dit systeem het voorkomen van oneerlijke concurrentie. Het is niet meer toegestaan de nationale industrie af te schermen door het stellen van afwijkende eisen. Bovendien is het hierdoor overbodig geworden producten aan de verschillende nationale eisen aan te passen. Dit scheelt in de kosten.

In het algemeen geldt dat de beveiliging in drie stappen wordt opgebouwd:
- Waar mogelijk moet de constructie van het product zo zijn uitgevoerd dat risico's uitgesloten zijn.
- Wanneer hieraan niet kan worden voldaan, moeten extra beveiligingen worden aangebracht. Bij het wegnemen van deze

beveiligingen, bijvoorbeeld voor het verrichten van instelwerkzaamheden, moet de machine automatisch worden uitgeschakeld.
- De nu nog resterende gevaren moeten zo veel mogelijk worden beperkt door middel van gebruiksaanwijzingen, waarschuwingen, verplichte trainingen en dergelijke.

Als voorbeeld behandelen we hier de normen die voor vonkerosiemachines gelden. Dit type machine hebben we behandeld in hoofdstuk 6.

Vonkerosiemachines zijn opgebouwd uit een aantal subsystemen:
- het mechanische gedeelte, de eigenlijke machine;
- de pulsgenerator, die de hoogfrequente spanning tussen elektrode en werkstuk opwekt;
- het servosysteem, dat de gereedschapsbewegingen uitvoert;
- het besturingssysteem, dat de servo's aanstuurt;
- het diëlektricumaggregaat, dat zorgt voor het filtreren en aanvoeren van het diëlektricum. Dit diëlektricum is veelal een brandbare vloeistof, bijvoorbeeld olie. In dit medium worden continu vonken opgewekt.

Elk van deze systemen kent zijn eigen eisen ten aanzien van veiligheid, gezondheid en milieu. Het meest kenmerkende systeem van vonkverspaningsmachines is het diëlektricumaggregaat. De belangrijkste risico's hiervan zijn:
- brandgevaar;
- het ontstaan van gevaarlijke dampen;
- het weglekken van het diëlektricum, waardoor de vloer in de omgeving van de machine glad wordt.

Bovendien moeten de risico's bij opslag, aan- en afvoer van de stoffen worden beschouwd.
Enkele belangrijke voorschriften betreffende het aggregaat van vonkverspaningsmachines zijn:
- het vonken moet plaatsvinden in een afzonderlijk omsloten ruimte;
- er moet een passende afzuiginstallatie aanwezig zijn;
- het vlampunt van het diëlektricum moet ten minste 60 °C bedragen;
- er moet een automatisch werkende blusinstallatie aanwezig zijn;
- een automatisch werkende niveauregeling moet ervoor zorgen dat het vonken ten minste 40 mm onder het vloeistofoppervlak plaatsvindt. Hierdoor kunnen de vonken de vloeistof niet ontsteken.

Dit zijn regels die hetzij de basisconstructie, hetzij de afzonderlijke beveiligingen betreffen. Voor de andere subsystemen gelden soortgelijke regels. Deze zullen veelal gelijk zijn aan de regels voor dergelijke subsystemen van andere machinetypen. Een voorbeeld hiervan is de regel dat het elektrisch systeem geen elektromagnetische storingen in de omgeving mag veroorzaken.

Daarnaast bestaan er regels over het werken met de machine:
- gebruiksaanwijzingen;
- onderhoudsvoorschriften;
- bevoegdheden en opleidingseisen voor bedienend personeel en onderhoudspersoneel;
- waarschuwingssignalen, zoals een rookverbod, en veiligheidsmiddelen in de onmiddellijke omgeving van de machine, zoals brandblussers.

Dit zijn dus beveiligingen van de derde categorie.

12.4 Analyse van kwaliteitsproblemen

Er bestaan verschillende methoden om kwaliteitsproblemen op een systematische wijze aan te pakken. De twee bekendste methoden bespreken we hier kort: de Pareto-analyse en het Ishikawa-diagram of visgraatdiagram.

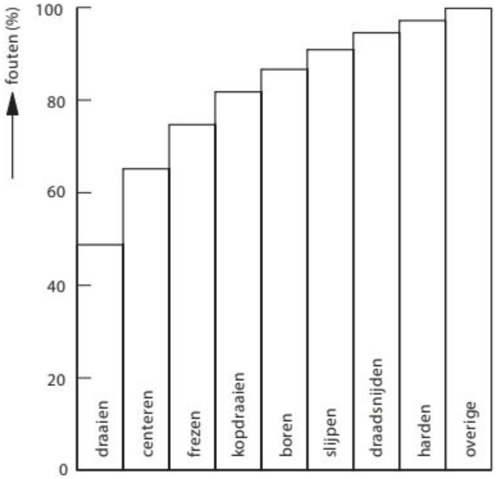
Pareto-analyse

De **Pareto-analyse** is gebaseerd op de **80-20-regel**. Hij vloeit voort uit ervaring in verschillende vakgebieden. Voor een supermarkt geldt bijvoorbeeld dat 80% van de omzet wordt gerealiseerd met circa 20% van alle artikelen. Voor kwaliteitsproblemen geldt meestal dat 80% van de afwijkingen voortkomt uit 20% van alle mogelijke oorzaken. Dit betekent dat het registreren en analyseren van alle storingen snel leidt naar de belangrijkste storingsbronnen. Het is dan meteen duidelijk welke problemen het eerste moeten worden aangepakt. In figuur 12.4 zie je een voorbeeld van een Pareto-analyse van de redenen tot afkeur van een product.

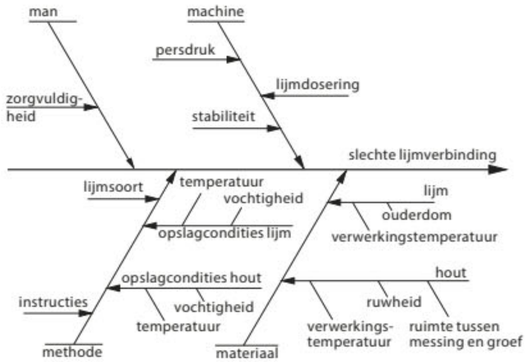
Ishikawa-diagram

Wanneer de storingsbronnen bekend zijn, betekent dat nog niet dat ook de oorzaken zijn achterhaald. Bovendien liggen achter een primaire oorzaak meestal dieper liggende oorzaken verborgen.

Bewerking		Aantal	%	Cumulatief %
draaien		346	47,4	47,4
centeren		126	17,3	64,7
frezen		71	9,7	74,4
kopdraaien		53	7,3	81,7
boren		41	5,6	87,3
slijpen		36	5,0	92,3
draadsnijden		28	3,8	96,1
harden		17	2,3	98,4
overige	wassen	4	0,5	98,9
	afbramen	1	0,1	99,0
	andere	7	1,0	100
totaal		730	100	100



Figuur 12.4 Pareto-analyse van de redenen tot afkeur van een product



Figuur 12.5 Ishikawa- of visgraatdiagram voor een lijmproces

Denk bijvoorbeeld aan het analyseren van ongevallen. Een primaire oorzaak van een ongeval kan zijn: de automobilist verleende geen voorrang. Een dieper liggende oorzaak kan zijn: hij was met zijn telefoon bezig, waardoor hij de andere weggebruiker niet zag aankomen. Het **Ishikawa-diagram** (zie figuur 12.5) of **visgraatdiagram** is een hulpmiddel om alle oorzaken in kaart te brengen en te voorkomen dat men te snel in één bepaalde richting zoekt en andere, misschien meer fundamentele, mogelijkheden over het hoofd ziet.

Voor kwaliteitsproblemen in een fabricageomgeving geldt een standaardbasisdiagram. Dit diagram gaat uit van de 4 M's, de primaire groepen van oorzaken van afwijkingen: Mens, Machine, Materiaal en Methode (zie figuur 12.5). Bij het analyseren van een probleem kan men van het basisdiagram uitgaan en de verdere vertakkingen invullen. Hiervoor is overleg tussen alle betrokkenen, vooral ook degenen die het werk uitvoeren, noodzakelijk. Het opsporen van de oorzaken van afwijkingen is belangrijk voor het verminderen van het aantal afwijkingen.

12.5 Procesbeheersing

In deze paragraaf bekijken we hoe productieprocessen kunnen worden beheerst. We bekijken hiervoor eerst hoe we de kwaliteit van een product kunnen beoordelen. Vervolgens richten we ons op spreiding in bewerkingsresultaten en op mogelijkheden om het proces zelf en de productgeometrie te beheersen.

12.5.1 Beoordeling van de kwaliteit van een product

Men kan pas beoordelen in hoeverre een product voldoet aan de verwachtingen van de klant nadat het hele voortbrengingstraject is doorlopen. De klant bestelt bijvoorbeeld een baggermolen die in staat moet zijn gedurende een voorgeschreven aantal etmalen per jaar een voorgeschreven hoeveelheid van een bepaalde grondsoort te baggeren. Pas nadat deze baggermolen is gebouwd, kan men testen of het eindproduct aan deze eisen voldoet. Dit zorgt voor veel onzekerheid, vooral omdat elke baggermolen een uniek product is. In de praktijk moet die onzekerheid zo veel mogelijk worden beperkt door na elke stap van het voortbrengingstraject het resultaat reeds te beoordelen.

In de ontwerpfase zal men, op grond van kennis en ervaring, trachten te beoordelen in hoeverre de baggermolen in staat is om aan de eisen van de klant te voldoen. Uit het basisontwerp worden de

specificaties van de verschillende systemen, bouwgroepen en onderdelen afgeleid, bijvoorbeeld van de elektromotor. Deze moet bij gegeven toerentallen een bepaald koppel kunnen leveren om de belastingen die tijdens het baggeren optreden te kunnen overwinnen. Als men die belastingen onderschat, voldoet de motor niet. In dat geval is de kwaliteit van het ontwerp dus slecht.

Omdat de elektromotor in hoge mate een standaardproduct is, zijn daarbij de onzekerheden ten aanzien van het ontwerp veel kleiner dan bij de baggermolen. Wel kan door allerlei oorzaken spreiding optreden in de functionele eigenschappen van individuele exemplaren die zijn gebouwd volgens hetzelfde ontwerp.

Uit deze gegevens zijn twee regels af te leiden:
- Ontwerp een uniek product zo veel mogelijk modulair op basis van betrouwbare standaardcomponenten.
- Ontwerp de standaardcomponenten zo dat ze als module afzonderlijk kunnen werken, zodat een functionele beproeving mogelijk is.

Een dergelijk ontwerp wordt een **modulair ontwerp** genoemd. Hier gaat het dus om het ontwerpen van producten met hoge kwaliteit. In hoofdstuk 11 hebben we modulair ontwerpen besproken met als doel de montage te vereenvoudigen. In hoofdstuk 17 bespreken we het nog als middel om tegen lage kosten aan uiteenlopende klantenwensen te voldoen. Ook voor standaardcomponenten streeft men naar een hoge betrouwbaarheid. Omdat de onzekerheden in het ontwerp daarvan echter veel kleiner zijn, is het in veel gevallen voldoende om de kwaliteit te beproeven van de afzonderlijke onderdelen en van de halffabricaten waaruit de onderdelen zijn vervaardigd. In dat stadium zijn eigenlijk maar twee aspecten goed te beoordelen: de vorm en afmetingen (de geometrie) en de materiaaleigenschappen. In de kwaliteitszorg krijgen deze aspecten dan ook veel aandacht. Men heeft voor dit doel veel verschillende meetmethoden ontwikkeld. We behandelen deze meetmethoden in de volgende paragrafen.

12.5.2 Spreiding in bewerkingsresultaten

Om inzicht te geven in het begrip spreiding bespreken we in deze paragraaf een eenvoudig proces: het bewerken van assen met een diameter van 50 mm. Het resultaat van voortdurend herhaalde

50,00	49,99	49,98	50,01	50,00
50,01	50,00	49,99	50,02	50,02
50,02	50,04	50,00	49,98	49,99
50,01	50,02	50,01	50,02	50,00
50,03	50,00	49,99	50,03	49,99
50,01	49,99	49,97	50,00	49,98
50,02	50,01	50,01	50,00	49,99
50,00	50,03	49,98	50,00	49,98
50,05	50,00	49,97	49,97	50,02
49,96	49,99	50,01	49,99	50,00

Figuur 12.6 Meetwaarden van de diameters van 50 bewerkte assen (mm)

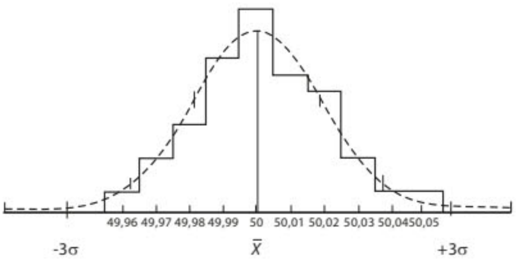
handelingen, zoals die bij de meeste bewerkingen voorkomen, kan meestal worden benaderd door de **normale verdeling**, ook wel Gauss-verdeling genoemd. De ligging van de **Gauss-kromme** wordt gekarakteriseerd door het rekenkundig gemiddelde $\bar{x}$ en de breedte door de **standaardafwijking** σ. Uitgaande van een reeks van n meetwaarden (x_i) kan de geschatte waarde s voor de standaardafwijking berekend worden volgens:

$$s=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_1-\bar{x}\right)^2}{n-1}}$$

Van een steekproef van 50 assen blijken de diameters tussen de grenzen 50,05 en 49,96 mm te liggen (zie figuur 12.6).

Een histogram biedt een overzichtelijke presentatie van de resultaten (zie figuur 12.7). Door de toppen van de blokken in het histogram met een vloeiende lijn te verbinden, ontstaat bij benadering de reeds genoemde normale verdeling. Je ziet dat het gemiddelde van de diameters dicht bij 50,00 mm ligt. Het berekende gemiddelde $\bar{x} = 50{,}0016$ mm. De instelling van de machine is dus goed. De waarde van s bedraagt 0,019 mm. Of de partij werkstukken goed is, hangt af van de tolerantie op de diameter. Zou deze bijvoorbeeld ± 0,02 mm bedragen, dan is de variatie binnen dit proces duidelijk te groot is om deze tolerantie te waarborgen. De ligging (**centrering**) van het proces is juist, maar de **spreiding**, het verschil tussen de laagste en de hoogste optredende waarde, is groter dan de werkstuktolerantie. Het proces voldoet dus niet aan de tolerantie-eis.

De **proceshaalbaarheid** C_p drukt de geschiktheid van een fabricageproces van een product uit in een getal.



Figuur 12.7 Histogram voor de verdeling van figuur 12.6. Gauss-kromme met $\overline{x} = 50{,}0016$ mm en $s = 0{,}019$ mm

Uit de statistiek is bekend dat bij een normale verdeling 99,73% van alle exemplaren uit een populatie binnen $\pm 3\sigma$ valt.
C_p geeft de relatieve spreiding aan, oftewel de verhouding van de breedte van het tolerantieveld T tot + en − driemaal de standaardafwijking ($\pm 3\sigma$ grenzen) van het proces. In formulevorm:

$$C_p = \frac{T}{6 \times \sigma}$$

De C_p-waarde van een proces moet groter zijn dan 1,0. Bij een zuivere centrering van het proces zal dan ten minste 99,73% van alle producten binnen de toleranties vallen. In de praktijk is het wenselijk dat de $C_p \geq 1{,}33$. In dat geval zullen bij een afwijking in de centrering van $1 \times \sigma$ nog steeds vrijwel alle producten binnen de tolerantie vallen. We noemen het proces dan **statistisch beheerst**. Wanneer $1 \leq C_p \leq 1{,}33$ bestaat er een groot risico op uitval.

De waarde C_{pk} is behalve een maat voor de spreiding ook een maat voor de ligging van het proces ten opzichte van het midden van het tolerantieveld, de **streefwaarde**. C_{pk} is het kleinste verschil tussen de gemiddelde maat en de bovenste of onderste tolerantiegrens in relatie tot driemaal de standaardafwijking:

$$C_{pk} = \min\left\{\frac{T\uparrow - \overline{x}}{3 \times \sigma}\right\}, \left\{\frac{\overline{x} - T\downarrow}{3 \times \sigma}\right\}$$

Hierin is $T\uparrow$ de bovenste en $T\downarrow$ de onderste tolerantiegrens.
Een C_{pk}-waarde van 1,0 betekent dat een proces met $C_p = 1{,}0$ zuiver gecentreerd moet zijn om te bereiken dat alle producten binnen de tolerantiegrenzen liggen. Bij een $C_{pk} < 1{,}0$ wordt een van de tolerantiegrenzen overschreden. Voor een beheerst proces zal $C_p \geq 1{,}33$ en $C_{pk} \geq 1$ moeten zijn. Het proces is dan zowel statistisch als **technisch beheerst**.

12.5.3 Mogelijkheden van procesbeheersing

In paragraaf 12.5.2 hebben we aangegeven dat productieprocessen beheerst moeten verlopen.
Dit betekent dat de onvermijdelijke spreiding in proces- en productkenmerken kleiner moet zijn dan de afstand tussen de tolerantiegrenzen en dat het gemiddelde in het midden van het tolerantieveld, de streefwaarde, ligt. Wanneer de spreiding kleiner is dan het tolerantieveld, mag ook het gemiddelde variëren. Hierdoor is de kans veel groter dat alle producten binnen de tolerantiegrenzen vallen.
Dit betekent dat niet alle producten gecontroleerd hoeven te worden en dat de kans op uitval gering is. Wel dient men regelmatig steekproeven te doen om te bewijzen dat het proces nog steeds beheerst is. Bij **regelbare processen** kan de verschuiving van het gemiddelde worden bijgestuurd. Een toename van de spreiding geeft dan aan dat er iets met de betrouwbaarheid van het proces aan de hand is. Zie verder paragraaf 12.5.4.

Deze werkwijze staat bekend als **statistische procesbeheersing**. Men verzamelt niet alleen gegevens om de processen te kunnen sturen, maar ook om het inzicht in de processen te vergroten en om te kwaliteit van de producten achteraf aan te kunnen tonen.

Processen waarvan de proceskenmerken een te grote spreiding vertonen zijn niet geschikt om de gevraagde toleranties waar te maken. Deze processen moeten dus worden vervangen door andere.

Bij een beheerst deelproces is het niet nodig om bij de volgende stap in het productieproces een **ingangscontrole** te verrichten. Dit geldt zowel binnen een bedrijf als bij een externe leverancier-klantrelatie. Vaak worden producten geleverd met een certificaat van de leverancier waarin onder andere de herkomst van de grondstoffen en de resultaten van de controles worden vermeld.

12.5.4 Beheersing van de productgeometrie

Bij **niet-regelbare processen** worden de geometrie en de maten van het product hoofdzakelijk bepaald door het gereedschap. Zo is de kwaliteit van producten die met een volgstempel zijn uitgesneden (zie paragraaf 7.1.4) vrijwel uitsluitend afhankelijk van de combinatie van materiaal en gereedschap. Een wijziging van de andere procesparameters heeft weinig invloed op de maat.

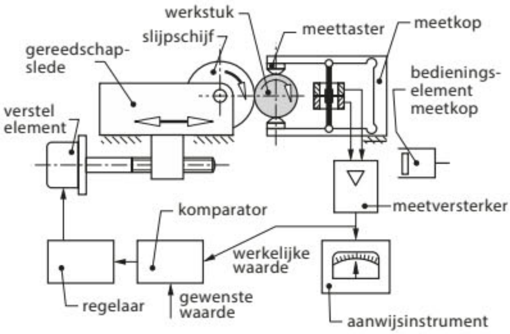
Bij **beperkt regelbare processen**, zoals gieten, spuitgieten en warmpersen wordt de productkwaliteit bepaald door:
- vorm- en maatnauwkeurigheid van de vormen of matrijzen;
- instelling en variatie van procesparameters zoals temperatuur, kracht, snelheid, en variaties in het uitgangsmateriaal en/of de smering.

Soms worden de gereedschapsmaten aan de hand van gegevens van een aantal proefproducten (meestal 3 à 20 stuks) geverifieerd. Na de start van de productie moet het proces worden bewaakt voor het signaleren van:
- plotselinge verstoringen, bijvoorbeeld door gereedschapsbreuk of door onregelmatigheden in de toevoer van het materiaal;
- geleidelijke veranderingen tijdens het verloop van het proces, bijvoorbeeld door gereedschapsslijtage.

Verspanend bewerken is een regelbaar proces. Bij een juiste aanpak van het meten en regelen kan men een doelmatige procesbeheersing realiseren.

De keuze van het meetsysteem en met name het tijdstip van meten in de bewerkingscyclus bepaalt of een werkstuk in één keer goed kan worden gemaakt. Daarom moet men reeds in een vroegtijdig stadium meten om de gunstigste voorwaarden voor de fabricage te scheppen.
Het meten kan in verschillende stadia van het fabricageproces plaatsvinden. Hierbij hanteert men de volgende begrippen:
- **pre-process control**, meten vóór het productieproces,
- **in-process control**, meten tijdens het productieproces,
- **inter-process control**, meten bij procesonderbreking (op de productiemachine),
- **post-process control**, meten na het productieproces.

De pre-process-maatregelen kunnen betrekking hebben op:
- het eenmalig instellen van de machine voorafgaand aan de bewerking van een serie producten;
- het per product of periodiek controleren of de instelling verlopen is, bijvoorbeeld ten gevolge van gereedschapsslijtage.
- het beoordelen of het uitgangsmateriaal aan de specificaties voldoet.



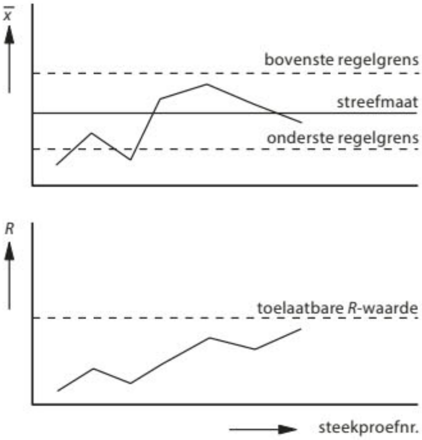
Figuur 12.8 Meetbesturing bij het rondslijpen

Pre-process-maatregelen hebben alleen effect op de kwaliteit als de stabiliteit en geometrische nauwkeurigheid van de machine groot genoeg zijn en regelmatig worden bewaakt (bijvoorbeeld door periodieke keuring van de productiemiddelen).

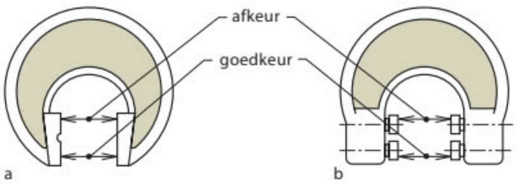
Het in-process-meten vindt tijdens de vormgeving van het product plaats. Soms wordt het gereedschap automatisch versteld tot de juiste maat van het product is bereikt. Een dergelijke **meetbesturing** wordt voornamelijk bij het rond- en vlakslijpen toegepast wegens de betrekkelijk snelle slijtage van de slijpschijf (zie figuur 12.8). Ook bij flexibele fabricagesystemen (zie paragraaf 13.6) is automatisch meten binnen de fabricagecyclus noodzakelijk. Het bedieningspersoneel voert hierbij immers geen cyclische handelingen uit, dus ook geen controlehandelingen.

Het inter-process-meten wordt nog steeds het meest toegepast in de kleinseriefabricage. Voor het inter-process-meten moet de fabricagecyclus worden onderbroken om het resultaat van de voorgaande processtap(pen) te kunnen meten en de machine voorafgaand aan de laatste bewerking zodanig te verstellen dat een 'goed' product ontstaat. Deze metingen worden meestal met handmeetmiddelen uitgevoerd; flexibele fabricagesystemen kunnen deze handelingen automatisch uitvoeren (zie paragraaf 13.6.2). Deze werkwijze is vooral zinvol voor niet-statistisch beheerste processen of wanneer het bewijs van statistische beheersing nog niet is geleverd. Spanfouten worden met inter-process-metingen niet opgespoord.

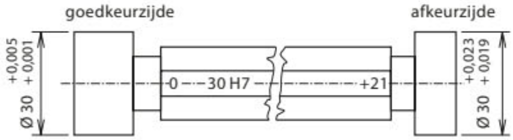
De pre-, in- en inter-process-methoden hebben het voordeel dat zij het ontstaan van afkeur kunnen voorkomen. Bij de post-process-methode kunnen in



Figuur 12.9 De $\bar{x}$-R-kaart



Figuur 12.10 Kalibers voor assen: vast (a), instelbaar (b)



Figuur 12.11 Kaliber voor een gat Ø 30 H7

principe 'afkeurproducten' ontstaan. Deze werkwijze leent zich daarom het beste voor statistisch beheerste processen. In dit geval kan men door regelmatig steekproeven te nemen het proces tijdig bijsturen. Een bekend hulpmiddel hierbij is de $\bar{x}$-R-kaart (zie figuur 12.9). Op deze kaart noteert de bedieningsman het gemiddelde $\bar{x}$ en de spreiding R van elke steekproef. Wanneer $\bar{x}$ de **onderste regelgrens** of de **bovenste regelgrens** bereikt, stelt hij het proces bij. Een te hoge waarde van R wijst op een storing waardoor het proces onvoldoende beheerst wordt. Om de storing zelfstandig te kunnen verhelpen, moet de bedieningsman voldoende kennis bezitten van het proces en voldoende begrijpen van de statistiek.

Het gebruik van pasmiddelen

Naast het meten van de kritische maten van producten kan men ervoor kiezen een **pasmiddel** te gebruiken, vaak **kalibers** genoemd. Een kaliber is een gereedschap dat aangeeft of een of meer maten van een product binnen of buiten de tolerantie liggen. Het is dus een goedkeur/afkeur-gereedschap. Zie voor enkele voorbeelden van kalibers de figuren 12.10 en 12.11.

Een dergelijk gereedschap geeft bij afkeur geen antwoord op de vraag hoe ver de maat buiten de tolerantie ligt. Bij goedkeuring geeft het ook niet aan waar de maat binnen het tolerantieveld ligt. Dit leidt tot een snelle en betrouwbare goed/afkeur-procedure die niet veel vakmanschap vereist. Het nadeel is echter dat het bewaken van het proces niet zonder meer mogelijk is. In principe kan men niet ingrijpen voordat de tolerantiegrenzen worden overschreden. Alleen door zogenaamde regelgrenskalibers te gebruiken kan men het proces tijdig bijstellen. Een statistische procesbewaking is met kalibers niet of maar beperkt mogelijk (met name via het opvolgen van het uitvalpercentage).

Conclusie

Meten voegt geen waarde aan het product toe, maar het kost wel tijd en dus geld. Een 'slecht' product wordt door het meten geen 'goed' product! De meetresultaten moeten direct worden gebruikt voor het sturen en analyseren van het proces, zodat alleen goede producten kunnen ontstaan. Hierbij moet men goed nagaan of het te meten (product)kenmerk een direct verband vertoont met de instelling van het proces.

Alleen bij de juiste keuze van:
- wat (maat, vorm van het product, en dergelijke);
- waar (plaats);
- wanneer (welk stadium van het proces);
- hoe en waarmee (meetmethode, meetmiddel, interpretatie);

moet worden gemeten, kan het meten bijdragen tot een wezenlijke verbetering van de kwaliteit, het kostenniveau, de leveringsbetrouwbaarheid en de leveringssnelheid.

12.6 Geometrische meettechniek

12.6.1 Inleiding

Een van de belangrijkste aspecten van de productkwaliteit wordt gevormd door de eisen voor maat en geometrie. Deze eisen (toleranties) geven aan in hoeverre de maat en geometrie van een product mogen afwijken van de streefmaat. Te grote afwijkingen maken het monteren van een samengesteld product moeilijk of zelfs onmogelijk. Ze kunnen de levensduur van het product beperken of het functioneren ervan verstoren. In veel gevallen is de eis dat delen **uitwisselbaar** zijn bepalend voor de tolerantie. Uitwisselbaarheid betekent dat exemplaren van delen die op elkaar moeten passen onderling verwisseld kunnen worden zonder bewerking. Zie voor een nadere beschouwing over uitwisselbaarheid paragraaf 11.1. De eisen voor de geometrie (maat-, plaats- en vormafwijkingen) en de microgeometrie van het product (de oppervlaktegesteldheid) hebben beide een eigen plaats en kunnen beide van belang zijn voor het functioneren van een product.

Om op economisch verantwoorde wijze aan de gestelde eisen te kunnen voldoen, moet aan de volgende voorwaarden zijn voldaan:

- De toleranties voor maat en geometrie moeten zo ruim mogelijk zijn. Men gaat hierbij uit van de functionele eisen. Een **robuust ontwerp** is een ontwerp dat ondanks betrekkelijk ruime toleranties goed functioneert.
- De maten en toleranties moeten worden aangegeven ten opzichte van geometrische entiteiten (referentievlakken en dergelijke) met een functionele betekenis. Deze entiteiten kunnen zowel bij het fabriceren als bij het meten als referentie dienen.
- Het fabricageproces moet aantoonbaar beheerst zijn.
- Het meetproces moet beheerst zijn en de kwaliteit van het meetproces, het geheel van

Nominale maat (mm)		Standaard tolerantiekwaliteiten																	
		IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
groter dan	tot en met	toleranties																	
		µm											mm						
-	3	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	0,1	0,14	0,25	0,4	0,6	1	1,4
3	6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	0,12	0,18	0,3	0,48	0,75	1,2	1,8
6	10	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	0,15	0,22	0,36	0,58	0,9	1,5	2,2
10	18	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	0,18	0,27	0,43	0,7	1,1	1,8	2,7
18	30	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0,21	0,33	0,52	0,84	1,3	2,1	3,2
30	50	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	0.25	0,39	0,62	1	1,6	2,5	3,9
50	80	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	0,3	0,46	0,74	1,2	1,9	3	4,6
80	120	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	0,35	0,54	0,87	1,4	2,2	3,5	5,4
120	180	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	0,4	0,63	1	1.6	2,5	4	6,3
180	250	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	0,46	0,72	1,15	1,85	2,9	4,6	7,2
250	315	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	0,52	0,81	1,3	2,1	3,2	5,2	8,1
315	400	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	0,57	0,89	1,4	2,3	3,6	5,7	8,9
400	500	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	0,63	0,97	1,55	2,5	4	6,3	9,7
500	630	9	11	16	22	32	44	70	110	175	280	440	0,7	1,1	1,75	2,8	4,4	7	11
630	800	10	13	18	25	36	50	80	125	200	320	500	0,8	1,25	2	3,2	5	8	12,5
800	1000	11	15	21	28	40	56	90	140	230	360	560	0,9	1,4	2,3	3,6	5,6	9	14
1000	1250	13	18	24	33	47	66	105	165	260	420	660	1,05	1,65	2,6	4,2	6,6	10,5	16,5
1250	1600	15	21	29	39	55	78	125	195	310	500	780	1,25	1,95	3,1	5	7,8	12,5	19,5
1600	2000	18	25	35	46	65	92	150	230	370	600	920	1,5	2,3	3,7	6	9,2	15	23
2000	2500	22	30	41	55	78	110	175	280	440	700	1100	1,75	2,8	4,4	7	11	17,5	28
2500	3150	26	36	50	68	96	135	210	330	540	860	1350	2,10	3,3	5,40	8,60	13,5	21	33

Figuur 12.12 Verband tussen maat, kwaliteitsklasse en grootte van het tolerantieveld

hulpmiddelen en werkmethoden bij het meten, moet in overeenstemming zijn met de gestelde product- en procestoleranties.

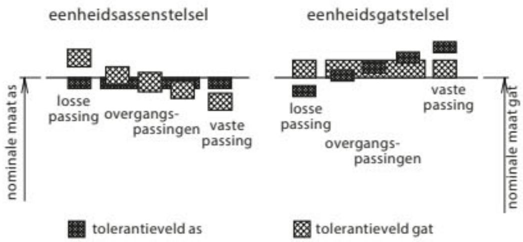
In de volgende paragrafen kijken we in dit verband achtereenvolgens naar passingen en toleranties, en naar oppervlaktegesteldheid. Verder bespreken we meetonzekerheid en het meetresultaat.

12.6.2 Passingen en toleranties

In een groot aantal gevallen kan de uitwisselbaarheid van delen worden gegarandeerd door de speling tussen twee delen en de bijbehorende toleranties te kiezen volgens het **ISO-passingstelsel**. Dit stelsel is in de eerste plaats gericht op de uitwisselbaarheid van as-gatcombinaties, maar is ook te gebruiken voor daarmee vergelijkbare gevallen. Afhankelijk van de functie van de delen kiest de ontwerper een geschikte **passing**. Dit is de combinatie van een bepaalde speling, het maatverschil tussen gat en as, en de **toleranties** op de maten van gat en as. De speling kan positief zijn, dan is het gat altijd groter dan de as. Dit heet een **losse passing**. Wanneer de speling negatief is (de as is altijd groter dan het gat), heet dat een **vaste passing**.

Ook bestaan er **overgangspassingen**, waarbij zowel positieve als negatieve spelingen kunnen voorkomen. De ligging van het tolerantieveld wordt voor assen aangeduid met kleine letters, voor gaten met hoofdletters. De grootte van het tolerantieveld wordt aangeduid met een getal, waarbij lage waarden op kleine toleranties duiden. Voor een gegeven getal hangt de grootte van het tolerantieveld samen met de nominale maat (zie figuur 12.12). Een passing wordt bijvoorbeeld aangeduid met H8/f7.

Het ISO-passingstelsel kent twee reeksen van passingen, het **eenheidsasstelsel** en het **eenheidsgatstelsel**. In het eenheidsasstelsel is de grootst toegestane maat van de as gelijk aan de nominale maat. De aanduiding hiervoor is hX (X staat voor een kwaliteitsgetal). De speling wordt bepaald door de ligging van het tolerantieveld van het gat ten opzichte van de nominale maat. Naarmate de letter in het alfabet verder voor de H ligt, is de speling groter. In het eenheidsgatstelsel is de kleinst toegestane maat van het gat gelijk aan de nominale maat (aanduiding HX) en wordt de speling bepaald door de ligging van het tolerantieveld bij de as. Ook hier geeft een letter in het alfabet vóór de H een positieve speling aan.

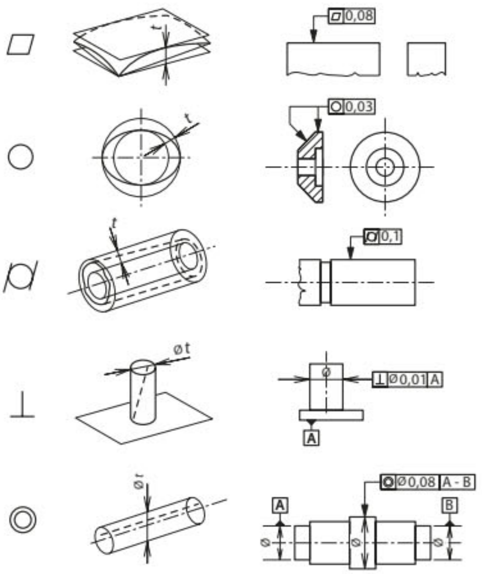


Figuur 12.13 Enkele passingsgevallen

Richtlijnen met toepassingsvoorbeelden helpen de ontwerper bij de keuze van de juiste passing. In figuur 12.13 zie je enkele voorbeelden van passingsgevallen. Het nauwkeurig bewerken van assen gemakkelijker dan het nauwkeurig bewerken van gaten. Het is daarom aan te bevelen de totale tolerantie op assen en gaten ongelijk te verdelen door de assen één kwaliteit nauwkeuriger te maken dan de gaten. De diameter van gaten wordt in de meeste gevallen bepaald door de vaste maat van het gereedschap; die van assen door een variabele instelling. Het eenheidsgatstelsel verdient daarom meestal de voorkeur. Het eenheidsasstelsel kan gunstig zijn wanneer het uitgangsmateriaal nauwkeurig voorbewerkt stafmateriaal is, of wanneer eenzelfde as door verschillende gaten met verschillende passingen moet bewegen. Een voorbeeld hiervan is de snijder van het fijnstansproces (zie figuur 7.11), die eerst met een ruime speling door de neerhouder beweegt, en daarna met beperkte speling door de snijplaat.

Het passingstelsel is vastgelegd in ISO 286-1 en -2. Daarnaast zijn de **geometrische toleranties**, (**vormtoleranties** en **plaatstoleranties**) volgens ISO 1101, ISO 17450, ISO 5458, ISO 5459 en andere normen van belang. Vormtoleranties bepalen toegestane afwijkingen van de vorm, zoals onrondheid van gaten en vlakheidsafwijkingen van vlakken. Plaatstoleranties bepalen de onderlinge posities van vormelementen, zoals de concentriciteit van twee boringen en de evenwijdigheid of haaksheid van twee vlakken. In figuur 12.14 zie je een aantal voorbeelden van vorm- en plaatstoleranties.

Onder conventies betreffende de geometrie van werkstukken vallen bijvoorbeeld de aanduidingen van nominale vormen en afmetingen en de toleranties daarop op technische tekeningen en in CAD-modellen. Deze conventies zijn vastgelegd in een stelsel van ISO-normen die de geometrische



Figuur 12.14 Voorbeelden van vorm- en plaatstoleranties

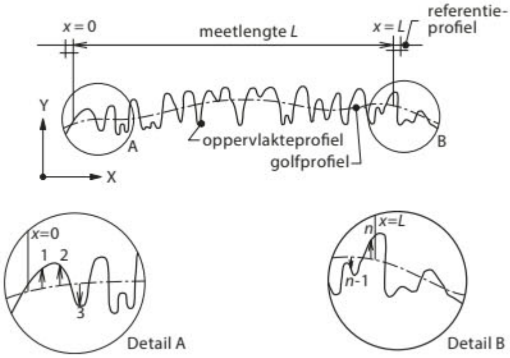
productspecificatie GPS betreffen. Deze normen omvatten eveneens de oppervlaktegesteldheid en de geometrische meettechniek. Deze internationale normen zijn moeizaam ontstaan uit een groot aantal soms zeer uiteenlopende nationale normen. De normen worden voortdurend aangepast aan de eisen die voortkomen uit miniaturisering, hogere nauwkeurigheid en andere toepassingsgebieden dan mechanische constructies.

12.6.3 Oppervlaktegesteldheid

Vormafwijkingen, golving en ruwheid

De afwijkingen van een vlak ten opzichte van de zuivere (theoretische) vorm zijn te onderscheiden in **vormafwijkingen** en **oppervlaktegesteldheid**. Oppervlaktegesteldheid kunnen we verdelen in **golving** en **ruwheid**.

De afwijkingen worden zichtbaar in de doorsnijding van een vlak loodrecht op het te beoordelen vlak. De begrenzingen tussen vormafwijkingen, golving en ruwheid worden verkregen door met behulp van filters de golflengten van de afwijkingen te scheiden. De normen schrijven voor hoe dit moet gebeuren. Boven een bepaalde golflengte wordt van vormafwijkingen gesproken, daaronder van golving en bij een nog kortere golflengte van ruwheid (zie figuur 12.15).



Figuur 12.15 Bepaling van de R_a-waarde

Vormafwijkingen strekken zich uit over een relatief grote lengte (circa 10 mm). Ze kunnen bijvoorbeeld worden veroorzaakt door de spanmethode, geometrische afwijkingen van de bewerkingsmachine of vervormingen van het werkstuk door bewerkingskrachten (zie figuur 5.43).

Golving bestaat uit toevallige en periodieke afwijkingen van het oppervlak. De afstanden zijn duidelijk groter dan bij ruwheid (circa 1 mm). Golving kan bij vormgenererende bewerkingen bijvoorbeeld worden veroorzaakt door ongewenste bewegingen, zoals trillingen tussen het vormgevend gereedschap en het werkstukoppervlak (zie figuur 12.15). Ruwheid wordt bepaald door de aard van onregelmatigheden met relatief korte afstanden tussen de pieken en dalen (circa 0,1 mm). Deze onregelmatigheden worden door de vormgevingsmethode (bijvoorbeeld verspanen) bepaald en zijn vaak van belang voor de functie van het oppervlak.

Bepalen van de ruwheid

Om van elk van deze afwijkingen de grootte te bepalen, is in de normen een **basislengte** *l* voorgeschreven. Deze basislengte is in overeenstemming met de betreffende golflengten. Het oppervlak dient te worden afgetast over een **meetlengte** *L*. De meetlengte bedraagt enkele malen de basislengte. De waarden van de vormafwijkingen, golving en ruwheid kunnen op verschillende manieren in een getalwaarde worden uitgedrukt. NPR 3639 biedt een overzicht van een groot aantal grootheden, de eisen aan de meetapparatuur en de aanwijzingen voor de uitvoering van metingen. Voor gedetailleerde definities verwijzen we naar NEN-ISO 4287 en ISO 11582. Voor de ruwheid wordt de ruwheidswaarde R_a (uit-

gedrukt in μm) het meest gebruikt. Deze **gemiddelde ruwheid** R_a wordt berekend volgens:

$$R_a = \frac{1}{L} \times \int_{x=0}^{x=L} |z|\,dx$$

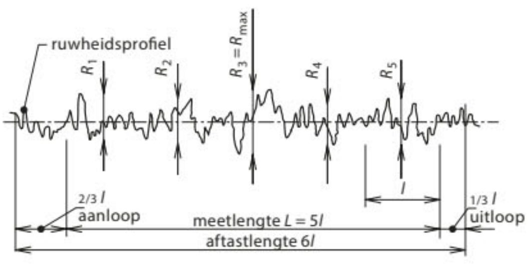
Dit komt overeen met de gemiddelde grootte van de afwijkingen van het oppervlakteprofiel ten opzichte van het golfprofiel. Op dezelfde wijze kunnen ook de vormafwijking en de golving bepaald worden, maar dan met de bijbehorende basislengte en meetlengte.

Een tweede definitie van een ruwheidswaarde volgt uit figuur 12.16. De totale meetlengte L wordt verdeeld in 5 gelijke delen met de basislengte l. Van elk van deze delen wordt het verschil tussen de hoogste en laagste piek bepaald. Dit is de **ruwheidshoogte** R_z. De hoogste R_z wordt de maximale ruwheidshoogte R_t genoemd en het gemiddelde van de 5 R_z-waarden de gemiddelde ruwheidshoogte R_{z5}.
De verhouding tussen R_z en R_a is afhankelijk van de vorm van het ruwheidsprofiel.

De historische definities bepalen ruwheid slechts langs een lijn (1D), hoewel in verschillende toepassingen de topologie van het oppervlak in alle richtingen (2D) belangrijk is. Daarom zijn deze definities in de recente ISO-standaard 25178 aangevuld met equivalente definities voor 2D-ruwheid, zoals S_a en S_z (zie ook in paragraaf 12.8 de figuur 12.31).

12.6.4 Meetonzekerheid

In paragraaf 12.5.2 lieten we zien dat bij fabricageprocessen spreiding optreedt. Een extra complicatie is echter dat ook de meting zelf niet de werkelijke waarde aangeeft. De **meetonzekerheid** (U) is een schatting die het gebied kenmerkt waarbinnen de werkelijke waarde van een gemeten grootheid ligt. Gewoonlijk kiest men hiervoor het gebied waar-



Figuur 12.16 Bepaling van R_{z5} en R_t

binnen 95% van de waarnemingen ligt. Dit komt overeen met de ±2σ-grenzen van het meetproces.

De meetonzekerheid wordt bepaald door de onbekende systematische afwijkingen en de toevallige afwijkingen van de gemeten waarde van de meetgrootheid.
De **toevallige afwijking** (ε) is de component van de afwijking van een meting die bij herhaalde metingen van dezelfde meetgrootheid op een onvoorspelbare manier varieert.

De **systematische afwijking** (δ) is de component van de afwijking van een meting die bij herhaalde metingen van dezelfde meetgrootheid constant blijft of op een voorspelbare manier varieert. De systematische afwijking bestaat zelf ook uit twee componenten:
- **statische afwijking**, een in de tijd stabiele afwijking;
- **dynamische afwijking**, een in de tijd veranderlijke afwijking.

De dynamische afwijking kan langzaam of snel veranderen. Ze verandert langzaam ten gevolge van temperatuur, vocht of slijtage, en snel ten gevolge van trillingen.

Het **onzuivere meetresultaat** Y_g moet voor de **bekende systematische afwijking** a worden gecorrigeerd. Dit kan gebeuren door corrigeren vóór het meten (**kalibreren**) of door corrigeren achteraf. Corrigeren achteraf vindt vaak plaats met behulp van een kalibratiegrafiek of kalibratietabel. Na correctie spreekt men over het **zuiver meetresultaat** Y_m:

$$Y_m = Y_g - a$$

De meetonzekerheid wordt bepaald door de onbekende systematische en de toevallige afwijkingen en heeft betrekking op het totale meetproces. Uiteraard draagt het meettoestel zelf in belangrijke mate bij tot deze meetonzekerheid. Maar er zijn meer factoren die bijdragen tot de totale meetonzekerheid:
- omgevingsfactoren (bijvoorbeeld temperatuurschommelingen);
- meetprocedures (bijvoorbeeld aangelegde meetkracht, waardoor het werkstuk vervormt);
- de operator (bijvoorbeeld afleesfouten);
- de formulering van de meetopdracht zelf (hoe meet je bijvoorbeeld de dikte van een tafelblad wanneer de boven- en onderzijde daarvan niet perfect parallel zijn?).

De totale meetonzekerheid is daardoor vaak significant hoger dan de meetonzekerheid die de fabrikant van het meettoestel heeft opgegeven. De fabrikant gaat namelijk uit van ideale omstandigheden. De ISO-standaard GUM geeft richtlijnen over het bepalen van de totale meetonzekerheid.

12.6.5 Het meetresultaat

Het **meetresultaat** is de door meting verkregen meetwaarde van een grootheid. Bij het opgeven van een meetresultaat moet men duidelijk aangeven of dit resultaat betrekking heeft op:

- de aanwijzing;
- het onzuivere meetresultaat;
- het zuivere meetresultaat.

Daarnaast moet men aangeven of het resultaat slechts één meting betreft of een berekening van het gemiddelde over meerdere metingen.

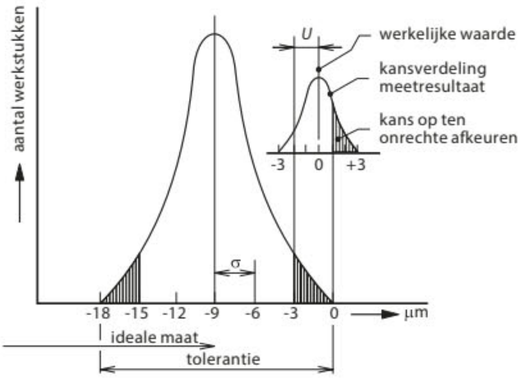
De aanwijzing van een meetmiddel of meetinstrument geeft de waarde in de gekozen meetgrootheid aan. De kleinst afleesbare stap van de aanwijzing, het **scheidend vermogen** of de **resolutie**, is geen maat voor de meetonzekerheid. De meetonzekerheid kan zelfs 100 maal slechter zijn dan de nauwkeurigheid van de aanwijzing. Het onzuivere meetresultaat wordt aan de hand van een of meer metingen bepaald en is niet gecorrigeerd voor bekende systematische afwijkingen. Na correctie spreekt men zoals gezegd van een zuiver meetresultaat.
Een volledige opgave van een zuiver meetresultaat gaat altijd gepaard met een vermelding van de meetonzekerheid en een opgave van de waarden van de mogelijke invloedsfactoren.

De **werkelijke waarde** Y_w van de meetgrootheid zal binnen de volgende grenzen liggen:

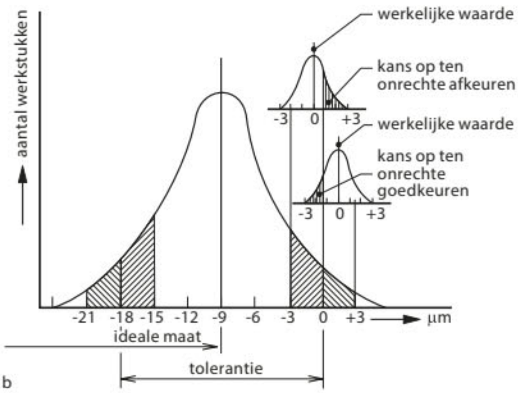
$$Y_m - U < Y_w < Y_m + U$$

Dus: werkelijke waarde = zuiver meetresultaat ± meetonzekerheid.

De meetonzekerheid leidt ertoe dat bij een zuiver gecentreerd proces met een C_p-waarde van 1,0, zoals aangegeven in figuur 12.17a, producten ten onrechte worden afgekeurd. De meetonzekerheid U komt in dit voorbeeld overeen met de standaardafwijking σ van de partij. Producten die tussen de 2σ- en 3σ-grenzen liggen, dus in de gearceerde



a



b

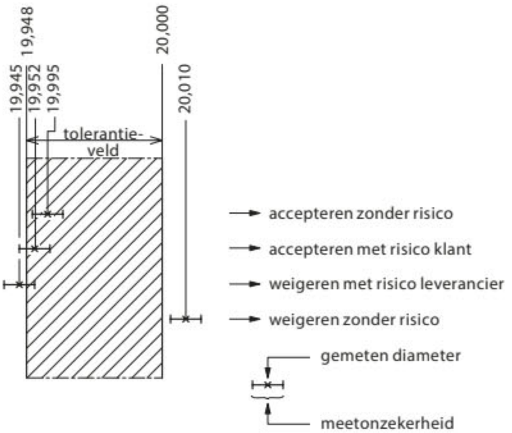
Figuur 12.17 Frequentieverdeling voor een C_p-waarde van 1,0, met kans op ten onrechte afkeuren (a), en voor een C_p-waarde < 1,0, met kans op ten onrechte goed- of afkeuren (b)

gebieden in de frequentieverdeling, lopen het risico te worden afgekeurd.

De partij in figuur 12.17b heeft een $C_p < 1,0$. Deze partij bevat meer producten binnen de tolerantiegrenzen die ten onrechte kunnen worden afgekeurd. Maar bovendien bestaat hier de mogelijkheid dat producten buiten de tolerantiegrenzen ten onrechte worden goedgekeurd. Het verkleinen van het tolerantieveld voorkomt ten onrechte goedkeuren, maar leidt tot nog veel meer ten onrechte afgekeurde producten.

In principe zijn deze problemen op drie manieren te voorkomen:

- Kies een fabricageproces met $C_p > 1$, bijvoorbeeld de eerdergenoemde waarde van 1,33. Dit verkleint



Figuur 12.18 Verdeling van de risico's voor de klant en de leverancier als gevolg van de meetonzekerheid

de kans op het ten onrechte goed- of afkeuren van producten, maar kan soms tot hogere fabricagekosten leiden.
- Verklein de meetonzekerheid. Ook dit verkleint de kans op het ten onrechte goed- of afkeuren van producten, maar kan tot hogere meetkosten leiden.
- Accepteer een zekere, maar kleine kans op ten onrechte goed- of afkeuren. Maak hierover afspraken met de afnemer, en zorg er daarbij voor dat de risico's zijn verdeeld over afnemer en leverancier. In figuur 12.18 zie je hiervan een voorbeeld. De overeengekomen grenzen voor acceptabele meetresultaten zijn 19,948 mm en 20,000 mm. De figuur laat zien wat de gevolgen zijn van verschillende meetwaarden bij de gegeven meetonzekerheid. De meetwaarde 19,952 mm wordt geaccepteerd, met het risico voor de klant dat de werkelijke waarde een stukje buiten de grens ligt. De meetwaarde 19,945 mm wordt geweigerd, met het risico voor de leverancier dat de werkelijke waarde binnen de grens ligt.

Er dient een goede samenhang te bestaan tussen de grootte van de tolerantie en de meetonzekerheid. Het gaat hierbij om twee zaken:
- de grootte van de meetonzekerheid ten opzichte van de tolerantie;
- de ligging van de meetonzekerheid ten opzichte van de tolerantiegrenzen.

In het verleden koos men meestal 1/10 van de tolerantie (*T*) als de te bereiken meetonzekerheid. Hierbij beschouwde men veelal ten onrechte het scheidend vermogen van het meetmiddel als waarde voor de meetonzekerheid. Deze regel ($U = T/10$) blijkt voor de kleinere producttoleranties zowel technisch als economisch niet haalbaar te zijn.
In de nationale en internationale normen wordt daarom steeds meer de volgende relatie als richtlijn gehanteerd:

$T > \text{IT7}$	$U = 1/10\ T$	$\pm U = 1/5\ T$
$\text{IT5} < T \leq \text{IT7}$	$U = 1/8\ T$	$\pm U = 1/4\ T$
$T \leq \text{IT5}$	$U = 1/4\ T$	$\pm U = 1/2\ T$

12.7 Meetmethoden voor lengtemetingen

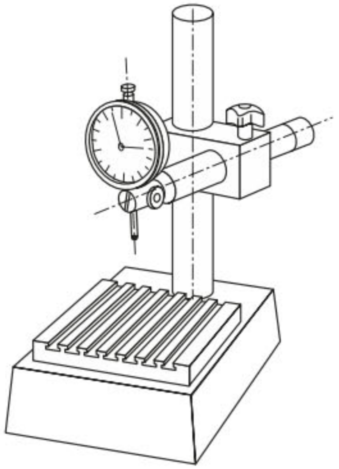
De belangrijkste functies van een meetmiddel of meetopstelling zijn:
- het opnemen of tasten van de meetpunten op het werkstukoppervlak;
- het omzetten/verwerken van het tastsignaal via meetsignaal naar meetresultaat;
- het presenteren van het meetresultaat in de vorm van een aanwijzing, een stuursignaal of gegevens.

Tasten is het kiezen van een meetpunt op het werkstukvlak. Dit kan met of zonder mechanisch contact plaatsvinden. Voor het contactloos tasten kunnen pneumatische, optische, elektrische en akoestische principes worden gebruikt.

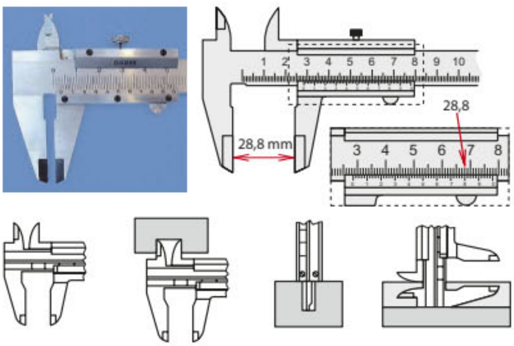
We beschouwen in deze paragraaf verschillende aspecten van het meten. We gaan in op het verschil tussen absoluut en vergelijkend meten en bespreken de meest gangbare fysische meetprincipes en meetinstrumenten. We kijken ook naar tweedimensionaal en driedimensionaal meten. Tot slot gaan we in op de keuze van de meetmethode.

12.7.1 Absoluut of vergelijkend meten

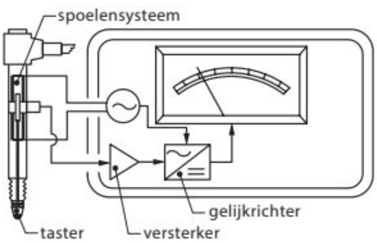
Een **absolute meting** levert rechtstreeks de gewenste waarde, bijvoorbeeld de diameter van een as. Bij een **vergelijkende meting** vindt een vergelijking plaats tussen het te meten object en een **lengtestandaard**. Deze lengtestandaard kan bijvoorbeeld een **instelring** zijn, of een combinatie van **eindmaten** met de nominale maat van het te meten object. Een instelring is een ring met een nauwkeurige boring van de betreffende diameter. Eindmaten zijn rechthoekige plaatjes met een zeer nauwkeurige lengtemaat. Door een aantal eindmaten op elkaar te schuiven kan men nauwkeurig elke gewenste lengte bepalen.



Figuur 12.19 Opstelling voor vergelijkend meten met een meetklok



Figuur 12.20 Mechanisch meten met een schuifmaat



Figuur 12.21 Meeteenheid met inductieve opnemer

Bij vergelijkend meten wordt het meetinstrument met behulp van de lengtestandaard zo afgesteld dat het midden van het tolerantieveld, de streefmaat, een aanwijzing van 0 oplevert. Het aanwijsinstrument toont de afwijkingen van de streefmaat. In de meeste gevallen kunnen op het aanwijsinstrument ook de tolerantiegrenzen aangegeven worden.

Figuur 12.19 toont een opstelling voor vergelijkend meten met een meetklok.

12.7.2 Fysische meetprincipes

In de geometrische meettechniek worden veel verschillende fysische meetprincipes toegepast. We behandelen hier alleen de meest gangbare principes en de daarop gebaseerde meetinstrumenten.

Mechanisch meten

De meettasters van mechanische meetinstrumenten maken contact met het te meten oppervlak. De gemeten waarde is rechtstreeks afleesbaar op een analoge schaalverdeling, zoals bij de liniaal, de rolmaat en de **schuifmaat** (afgebeeld in figuur 12.20), of via een mechanische overbrenging, zoals bij de schuifmaat met klokaflezing, de **schroefmaat** en de **meetklok**. Sommige van deze mechanische meetinstrumenten zijn uitgerust met een digitale aanwijzing. Dit verhoogt de nauwkeurigheid van het instrument niet, maar verkleint wel de kans op afleesfouten. Daardoor is de meetonzekerheid minder groot.

Elektrisch meten

Bij de elektrische of elektronische meetmiddelen zijn de volgende kenmerken van belang:
- opnemen met of zonder mechanisch contact;
- analoge of digitale uitvoer.

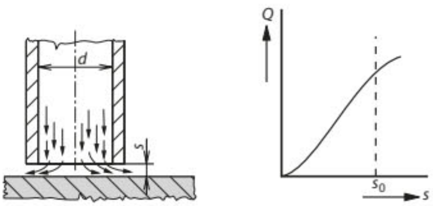
Van de gangbare elektrische meetprincipes, Ohmse weerstandmeting, capaciteitsmeting, piëzo-elektriciteitsmeting en inductiemeting, behandelen wij alleen de inductiemeting. Dit principe wordt in de lengtemeettechniek het meest toegepast. Het door de taster verplaatsen van de ferrietkern in de **inductieve opnemer** verandert de inductie van een met wisselstroom gevoed spoelensysteem (zie figuur 12.21). Dit levert een signaal dat na versterken en gelijkrichten op een aanwijsinstrument zichtbaar wordt gemaakt. Inductieve opnemers kunnen in zeer kleine afmetingen worden uitgevoerd en kunnen een hoge resolutie bij lage meetkrachten leveren. Op het aanwijsinstrument kunnen het nulpunt, de meetrichting, het meetgebied, de resolutie en de tolerantiegrenzen worden ingesteld.

Moderne elektronische meetinstrumenten leveren een digitaal uitgangssignaal. Hiermee kunnen de meetgegevens aan een computer worden toege-

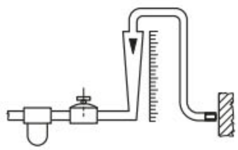
voerd, die ze automatisch verwerkt. De statistische analyse van de gegevens kan ook automatisch plaatsvinden. Het systeem kan bijvoorbeeld de $\bar{x}$ -R-kaart op een beeldscherm presenteren of zelfs het proces bijstellen.

Pneumatisch meten

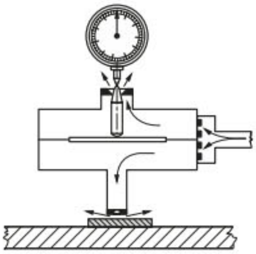
Luchtmeting is een **contactloze meetmethode**, waarbij te verwaarlozen krachten op het werkstuk worden uitgeoefend. De meting zelf vervormt daardoor het werkstuk niet, waardoor ze het resultaat niet beïnvloedt. Het principe berust op het meten van de uit de taster afkomstige luchtstroom door een nauwe spleet met breedte s tussen taster en werkstuk (zie figuur 12.22a). Als de afstand toeneemt, daalt de stromingsweerstand in de spleet en stijgt de doorstromende luchthoeveelheid. De eigenlijke meting berust op het meten van de luchtvolumestroom Q (zie figuur 12.22b) of van de verplaatsing van het membraan tussen de beide kamers in een differentiaaldruk-meetsysteem (zie figuur 12.22c). Het bruikbaar meetbereik ligt in het gebied waar het verband tussen s en Q of s en de verplaatsing lineair is. Dit beperkt het meetbereik tot ongeveer 0,1 mm. Het principe is vooral geschikt voor het vergelijkend meten binnen een klein meetgebied. Als standaardmaat dient een zeer nauwkeurig vervaardigd modelproduct waarmee de meetopstelling wordt afgesteld.



a



b



c

Figuur 12.22 Pneumatisch meten, het meetprincipe (a), uitgevoerd met volumestroommeting (b) en uitgevoerd met een differentiaaldruk-meetsysteem (c)

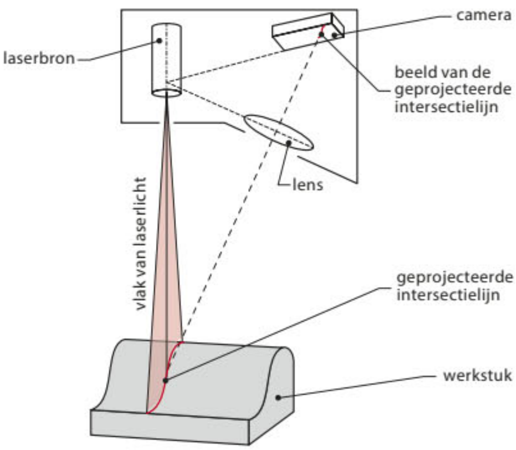
Optisch meten

Van het grote aantal **optische meetprincipes** behandelen we hier drie voorbeelden: de laserlijnscanner, de optisch-elektronische taster en de laser-interferometer.

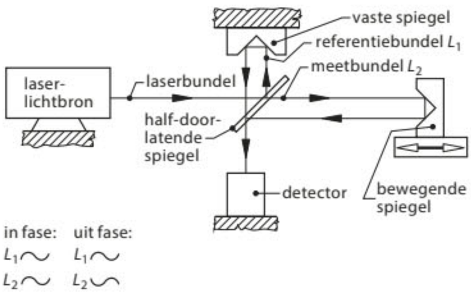
Bij **laserlijnscanners** projecteert een laserbron een lijn op het werkstukoppervlak die door een digitale camera geobserveerd wordt (zie figuur 12.23). Door triangulatie kunnen vervolgens de coördinaten van de punten op het meetoppervlak worden bepaald. Het is noodzakelijk dat het laserlicht diffuus gereflecteerd wordt, zodat er voldoende licht invalt op de camera. Sterk reflecterende of transparante oppervlakken worden daarom eerst met een fijne diffuus-reflecterende poederlaag bedekt. Door de laserlijnscanner over het oppervlak te bewegen, kan een volledig 3D-model van het werkstukoppervlak bepaald worden.

De **optisch-elektronische taster** is voorzien van een digitaal meetsysteem. De verplaatsing van een glazen liniaal wordt met een 10 µm-raster of een 4 µm-faseraster foto-elektrisch uitgelezen en met een teller op 0,01 tot 10 µm aangegeven. Zie voor meer informatie over dit principe paragraaf 13.5.2.

De **laser-interferometer** (zie figuur 12.24) splitst de laserbundel in een referentiebundel en een meetbundel. De referentiebundel heeft een vaste lengte; de lengte van de meetbundel hangt af van de positie van de bewegende spiegel. Bij verplaatsing van de spiegel over 1/4 golflengte van het gebruikte licht neemt de lengte van de meetbundel toe met 1/2 golflengte. Bij het hercombineren van de beide bundels treedt interferentie op. Bij het verplaatsen van de spiegel over de genoemde afstand treedt eenmaal maximale versterking en eenmaal maximale verzwakking van de samengevoegde bundels op. Dit wordt door de detector gemeten. De golflengte wordt beïnvloed door de atmosfeer van de meetomgeving; het is mogelijk



Figuur 12.23 Principeschets van een laserlijnscanner

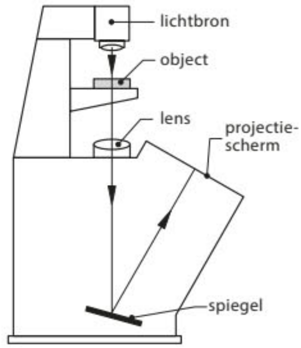


Figuur 12.24 Laser-interferometer

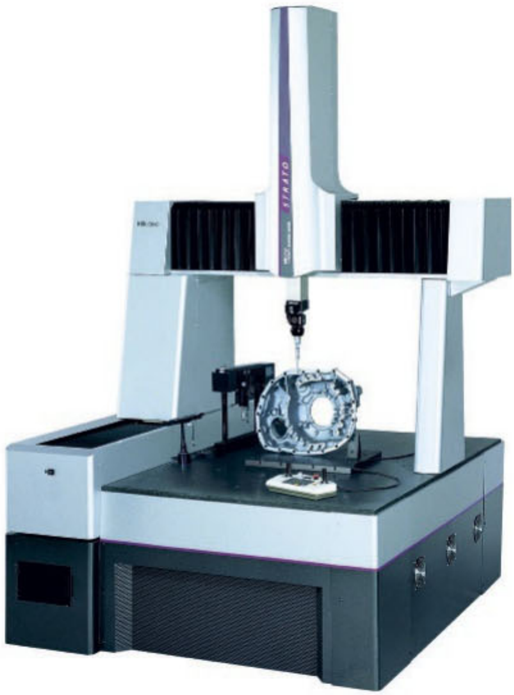
hiervoor te compenseren. In de praktijk levert dit een meetonzekerheid op van 0,5-1 μm/m bij een resolutie van 0,1 μm tot 10 nm. De laser-interferometer is bij uitstek geschikt voor het meten over een groter meetgebied (tot 20 m en meer). De vereiste apparatuur is kostbaar. Een belangrijke toepassing ervan is het ijken van andere meetmiddelen, zoals eindmaten of de meetsystemen op assen van NC-gereedschapswerktuigen.

12.7.3 Tweedimensionaal en driedimensionaal meten

Voor het efficiënt meten van een werkstuk is een enkelvoudige lengtemeting vaak ontoereikend. Daarom past men soms voor het meten van profielen en hoeken in twee dimensies de **meetmicroscoop** en de **profielprojector** (zie figuur 12.25) toe. Beide instrumenten zijn geschikt om metingen contactloos uit te voeren.



Figuur 12.25 Profielprojector

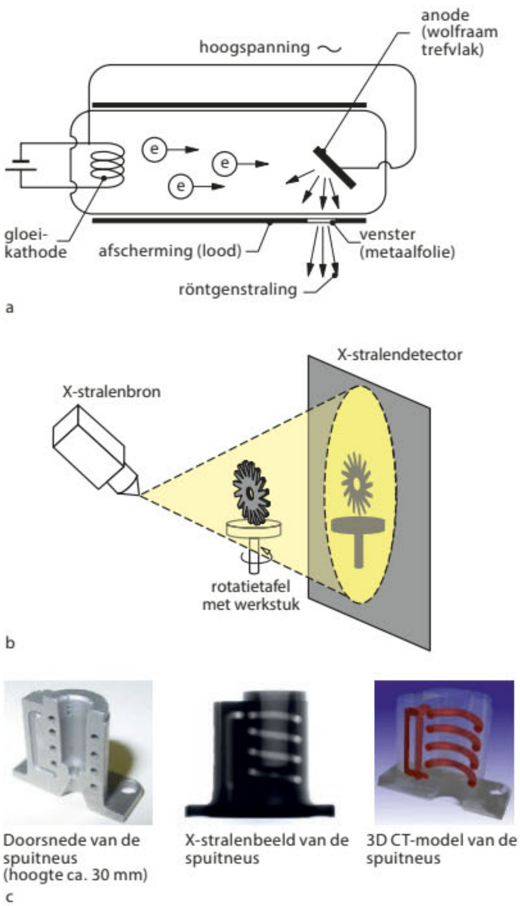


Figuur 12.26 Coördinaten-meetmachine met werkstuk (Mitutoyo)

Voor het meten in drie dimensies van complexe producten worden **coördinaten-meetmachines** (**CMM**) toegepast (zie figuur 12.26). Sleden die zijn uitgerust met optisch-elektronische meetsystemen verplaatsen de taster in de richting van de coördinaatassen. Zulk soort sleden worden ook gebruikt voor NC-gereedschapswerktuigen (zie paragraaf 13.5.2). Tactiele probes geven een signaal wanneer de taster het meetobject raakt. De te meten coördinaten volgen dan uit de positie van de assen van de

CMM op het moment van schakelen. Naast tactiele probes worden ook optisch-elektronische probes en visiesystemen in toenemende mate gebruikt op CMM's. Hierdoor groeien CMM's uit tot zeer flexibele multi-sensormeetsystemen. De coördinaten-meetmachine is gekoppeld aan een computer voorzien van programmatuur voor het verwerken en vastleggen van de meetgegevens en voor het sturen van de machine.

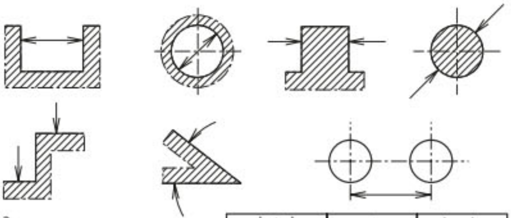
Een recente ontwikkeling is het gebruik van **X-stralen-computertomografie** (CT) voor dimensionele meettechniek. In een X-stralenbron worden X-stralen (of röntgenstralen) opgewekt door elektronen in vacuüm eerst te versnellen aan de hand van een hoogspanningsveld, waarna ze botsen tegen een werkvlak en dus plotseling afremmen. Hierbij wordt de kinetische energie van de elektronen omgezet in warmte en in X-stralen (zie figuur 12.27a). De golflengte van deze X-stralen of röntgenstralen (10^{-9}-10^{-12} m) is vergelijkbaar met de afstand tussen atomen in vaste stoffen, waardoor ze zich vrij gemakkelijk door materialen voortplanten. De straling wordt door het werkstukmateriaal in een bepaalde mate geabsorbeerd, afhankelijk van de gebruikte instellingen en van de materiaalsoort en -dikte. Zo absorbeert lood X-stralen beter dan staal, wat op zijn beurt weer beter absorbeert dan aluminium of polymeren. Hoe dikker het materiaal, hoe meer stralen er zullen worden geabsorbeerd. Een sterkere absorptie leidt tot een geringere belichting van de detector die achter het doorstraalde materiaal is geplaatst (zie figuur 12.27b). In een CT-scanner wordt het werkstuk op een draaitafel geplaatst, waardoor opeenvolgend vanuit verschillende hoeken X-stralenbeelden genomen kunnen worden. Via computeralgoritmes is het mogelijk vanuit deze beelden een volledig 3D-model van het werkstuk te reconstrueren (zie figuur 12.27c). Dit model kan dan vergeleken worden met het 3D-CAD-model. Door middel van X-stralen-CT kunnen moeilijk bereikbare en inwendige structuren worden geïnspecteerd. Het wordt dan ook veel toegepast bij complexe werkstukken geproduceerd via additieve technieken. Inspectie na montage is echter ook mogelijk. Bovendien kan uit de gereconstrueerde beelden ook materiaalinformatie worden bepaald. Het gaat dan bijvoorbeeld om informatie over porositeit, de aanwezigheid van scheurtjes of de vezeloriëntatie in composieten.



Figuur 12.27 X-stralen-computertomografie: X-stralenbron (a) en CT-scanner (b) en toepassing van CT op een additief geproduceerd stuk met conformal coolingkanalen (c)

12.7.4 Keuze van de meetmethode

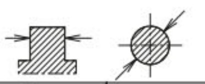
De keuze van de meetmethode wordt in de eerste plaats bepaald door de vorm en de afmetingen van het meetobject en door de toleranties. Het materiaal is van belang voor de toelaatbare meetkracht. Daarnaast speelt een aantal andere factoren een belangrijke rol, zoals:
- het bedrijfsbeleid ten aanzien van de kwaliteitszorg;
- de meetomgeving;
- de beschikbare meetapparatuur;
- meten op of buiten de bewerkingsmachine;
- de seriegrootte;
- de verdere verwerking van de meetgegevens.



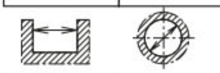
a

		werkstuk-tolerantie (µm)	meet-bereik (µm)	schaal-waarde (mm)
	meetklok	100 - 20 100 - 20 100 - 20 50 - 20 50 - 20 50 - 5	100 50 30 10 3 5	0,01 0,01 0,01 0,01 0,01 0,001
	indicateur	400 - 100 40 - 20 20 - 10 4 - 2 2 - 1 1 - 0,4	3 0,5 0,26 0,1 0,05 0,02	0,1 0,01 0,005 0,001 0,0005 0,0002
	meethor-loge	40 - 20 8 - 4 4 - 20	1,2 0,8 0,08	0,01 0,002 0,001
	inductieve opnemer	30 - 20 0,5 - 0,3	0,6 0,006	0,01 0,0001

b



		werkstuk-tolerantie (µm)	verstelbereik (mm)	meet- en schaalbereik (mm)	schaalwaarde (mm)
	schuifmaat	300 - 100	0 - 150 → ?	—	0,05 (0,02)
	schroef-maat	40 - 15	0 - 25 → ?	25	0,01
	meetstatief met indicateur	15 - 4	0 - 300	0,1	0,001
	meet-mikroscoop	30 - 10	0 - 150	—	0,005 (0,002)



		werkstuk-tolerantie (µm)	verstelbereik (mm)	meet- en schaalbereik (mm)	schaalwaarde (mm)
	schuifmaat	300 - 100	0 - 150 → ?	—	0,05 (0,02)
	binnen-schroefmaat	80 - 30	5 - 30 → 100	25	0,01
		30 - 20	6 - 8 → 200	—	0,005 (0,002)
		10 - 5	0,05 → 500	—	—

c

Figuur 12.28 Richtlijnen voor de keuze van de juiste meetmethode. Basisvormen (a), meetgebieden van opnemers (b) en enkele voorbeelden van meetinstrumenten (c)

In paragraaf 12.6.5 hebben we richtlijnen gegeven voor de meetonzekerheid als functie van de kwaliteitsklasse. Met behulp van deze richtlijnen kan men een geschikte meetmethode kiezen voor een bepaald product. Voor de meest gangbare gevallen is hiervoor de richtlijn uit figuur 12.28 beschikbaar. In deze figuur vind je voor een aantal basisvormen de mogelijke meetmethoden als functie van de tolerantie. We geven steeds de meetopstelling, de meetopnemer, het meet- en/of verstelgebied, en de schaalwaarde. Figuur 12.28a geeft de basisvormen, figuur 12.28b de meetopnemers en figuur 12.28c is een uittreksel uit de richtlijnen voor twee basisvormen.

Bij eenvoudige producten en kleine seriegroottes zal de keuze op standaardmeetgereedschappen vallen. Bij grotere series zal men eerder kiezen voor productgerichte opstellingen, die dan vaak meerdere metingen tegelijkertijd uitvoeren.
Kleine productseries zullen vaak 100% gecontroleerd worden. Wanneer de tolerantie-eisen hoog zijn en het fabricageproces (nog) onvoldoende beheerst wordt, zal men inter-process-meten toepassen. Nabewerken en enige afkeur kunnen dan aanvaardbaar zijn. Bij grote aantallen is het noodzakelijk te zorgen voor een statistisch beheerst fabricageproces. Het meten zal hierbij steekproefsgewijs plaatsvinden. De meetgegevens moeten worden vastgelegd en gearchiveerd om ook na lange tijd de beheersing van het proces te kunnen aantonen. Elektronische verwerking van de meetgegevens voor bijvoorbeeld de bepaling van de C_p-waarde en de C_{pk}-waarde kan hierbij nuttig zijn.

Voor het uitvoeren van een volledige meting aan een werkstuk met complexe vormen is een coördinaten-meetmachine onmisbaar. Het volledig meten van series producten kan veel tijd kosten, maar in de meeste gevallen is het voldoende een eerste product, of een kleine 'voorserie', volledig te meten. Het betreft hier meestal producten die wegens hun moeilijkheidsgraad met NC-gereedschapswerktuigen worden gefabriceerd. Wanneer het bewerkingsprogramma eenmaal correct gebleken is en het eerste product is goedgekeurd, zal het vaak mogelijk zijn de resterende geometrieafwijkingen met eenvoudige metingen op te sporen. Er kan bijvoorbeeld sprake zijn van een toenemende draaidiameter door slijtage van een draaibeitel.

12.8 Meetmethoden voor de oppervlakteruwheid

Voor het bepalen van de oppervlakteruwheid zijn verschillende methoden beschikbaar. Hier bespreken we alleen het vergelijken met ruwheidsmonsters en de ruwheidsmeter.

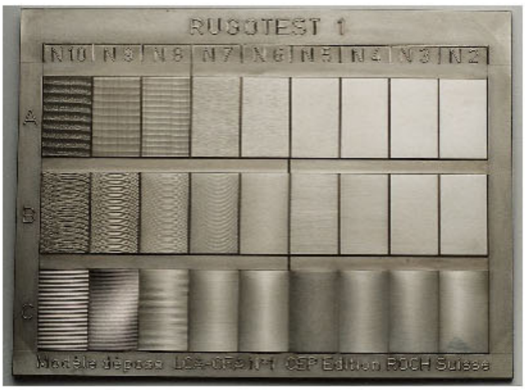
Vergelijken met ruwheidsmonsters

Voor de meest gangbare afnemende bewerkingen zijn **ruwheidsmonsters** verkrijgbaar. Dit zijn plaatjes die met verschillende ruwheden zijn vervaardigd (zie figuur 12.29). De ruwheid van het werkstukoppervlak wordt vergeleken met een bepaald ruwheidsmonster. Dit doet men zowel visueel als door het monster af te tasten met een vingernagel. Dit is een grove en subjectieve methode.

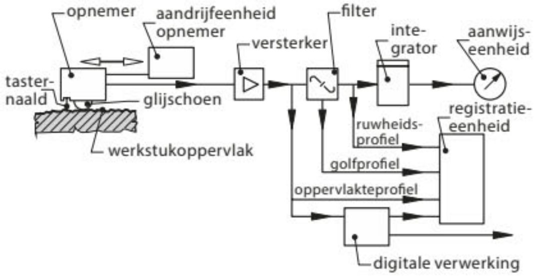
Ruwheidsmeter

Er bestaan verschillende ruwheidsmeetsystemen. Het bekendst zijn de **ruwheidsmeters** met mechanische of optische taster. Bij de ruwheidsmeter met mechanische taster wordt het werkstukprofiel afgetast met een diamantnaald met een zeer kleine topradius. Ondanks de geringe tastkracht worden gevoelige oppervlakken hierdoor beschadigd. De tastnaald kan daarom worden vervangen door het brandpunt van een gefocusseerde laserstraal.

Het principe van een ruwheidsmeter met mechanische taster hebben we afgebeeld in figuur 12.30. Het belangrijkste probleem bij deze systemen is het scheiden van de ruwheid en de overige afwijkingen van het oppervlak, zoals de golvingen en de vormafwijkingen. De tasteenheid bestaat daarom meestal uit een **glijschoen** en een taster. De glijschoen moet de afwijkingen van het oppervlak zo volgen dat de taster uitsluitend de ruwheid meet. Dit is maar ten dele mogelijk. De geometrie van het tastsysteem bepaalt de mate van scheiding tussen de vormafwijkingen enerzijds en de golvingen anderzijds. De afrondingsstraal van de glijschoen moet ten minste 50 maal de golflengte bedragen. De radius van de taster moet klein genoeg zijn om het ruwheidsprofiel te kunnen volgen. Een kleine tasterradius leidt echter tot snelle slijtage en dus ook weer tot meetafwijkingen. Voor ruwheidswaarden groter dan R_a = 0,5 µm of R_z = 3 µm kan een tasterradius van 5 µm worden gebruikt. Lagere ruwheidswaarden kunnen alleen met een kleinere tasterradius (bijvoorbeeld van 2 µm) worden gemeten. Voor zeer lage ruwheden wordt bij voorkeur een optische taster gebruikt.



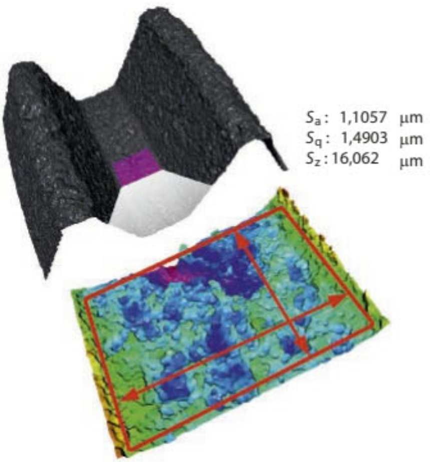
Figuur 12.29 Ruwheidsmonsters



Figuur 12.30 Ruwheidsmeetsysteem met mechanische taster en geleiding van de taster over het werkstuk

De scheiding tussen golvingen en ruwheid vindt plaats door een elektronische verwerkingseenheid. Het aftasten van het ruwheidsprofiel geschiedt met een vaste snelheid. Bij analoog werkende ruwheidsmeters scheiden frequentiefilters de frequenties van de signalen ten gevolge van het ruwheidsprofiel en die ten gevolge van de golving. De geometrie van de tasteenheid en de karakteristiek van de filters kiest men op basis van het verwachte profiel van het te beoordelen oppervlak. Kenmerkend hierbij is de basislengte *l*. De basislengte moet afhankelijk van de aard van het oppervlak volgens de richtlijnen in de betreffende norm worden gekozen. Tegenwoordig geschiedt de signaalverwerking geheel digitaal.

De aanwijseenheid geeft de gemeten waarde van de vormafwijking, de golving of de ruwheid. Ook kan het profiel vergroot worden weergegeven, bijvoorbeeld op een papierstrook of een beeldscherm.
In het laatste geval is de keuze van de lengte- en



Figuur 12.31 Resultaat van een 2D-ruwheidsmeting (Alicona)

hoogteschalen van belang, anders kan het resultaat niet juist geïnterpreteerd worden. Het profiel kan zowel zonder als met filtering worden weergeven. Hierdoor kunnen indien gewenst de vormafwijking, de golving of de ruwheid duidelijker wordt afgebeeld.

Bij de ruwheidsmeter met contactloze taster is de mechanische taster vervangen door een optisch tastsysteem. Dit systeem werkt volgens hetzelfde principe als het tastsysteem van een cd-speler. De meetbundel heeft een doorsnede van 1 µm en is daardoor geschikt voor zeer fijne oppervlakken. Terwijl tactiele ruwheidsmeters uitsluitend ruwheid meten langs een lijn (1D), laten optische systemen ook toe de ruwheid en textuur van een oppervlak (2D) te bepalen (zie figuur 12.31).

12.9 Meetmethoden voor materiaaleigenschappen

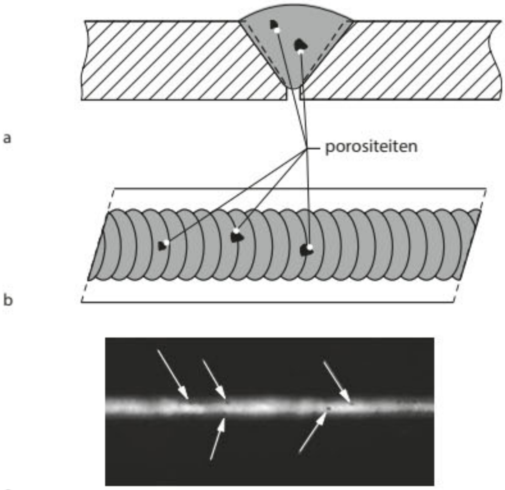
Naast de afmetingen en oppervlaktekwaliteit zijn de mechanische eigenschappen en de integriteit van halffabricaten en producten van groot belang.
In de meeste gevallen gaat men ervan uit dat halffabricaten ruimschoots voldoen aan de minimaal vereiste sterkte. Over de eigenschappen die het materiaalgedrag bij de uiteenlopende bewerkingen bepalen is men vaak minder zeker. Dit geldt met name bij het omvormen van plaatmateriaal. Het is daarom van belang om, naast de gebruikelijke minimale waarden van rekgrens, treksterkte en breukrek, aanvullende eisen te formuleren. Deze eisen zijn bepalend voor de bewerkbaarheid bij het omvormen. Voor een beschrijving van deze eigenschappen verwijzen we naar hoofdstuk 2. Er moet dan ook met de leverancier worden afgesproken op welke wijze deze technologische eigenschappen worden gecontroleerd.

Met **integriteit** wordt de afwezigheid van plaatselijke afwijkingen bedoeld, zoals (micro)scheuren aan het oppervlak of holten in het inwendige van het materiaal. Deze afwijkingen kunnen ontstaan door:
- krimpholtes die optreden bij gieten of lassen;
- scheuren die optreden door inwendige spanningen, bijvoorbeeld veroorzaakt door warmtebehandelingen of lassen;
- holtes die onvoldoende zijn dichtgelast bij kneedprocessen zoals walsen of extruderen;
- scheuren of andere materiaalverstoringen die optreden als gevolg van omvormende of afnemende bewerkingen.

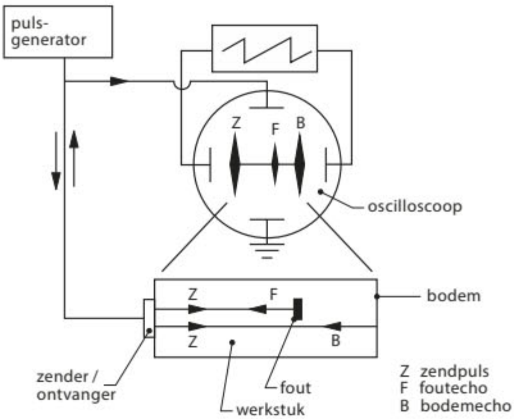
Onderzoek naar de integriteit gebeurt met **niet-destructief onderzoek** (**NDO**). NDO is een verzameling werkwijzen waarmee plaatselijke afwijkingen zijn op te sporen zonder het product te beschadigen. In deze paragraaf behandelen we de principes en toepassingsgebieden van de belangrijkste NDO-technieken: röntgenonderzoek, ultrasoon onderzoek, penetrant onderzoek, magnetisch onderzoek en wervelstroomonderzoek.

Bij **röntgenonderzoek** wordt een X-stralenbeeld van het werkstuk gebruikt om scheuren, porositeit of inclusies te identificeren (zie figuur 12.32). De methode bezit een beperkt scheidend vermogen omdat de totale dikte van het doorstraalde materiaal wordt gemeten. Een scheur met een dikte kleiner dan 1% van de totale materiaaldikte kan nauwelijks worden gedetecteerd.
Bij het uitvoeren van een röntgenonderzoek gelden strenge veiligheidsvoorschriften.

Bij **ultrasoon onderzoek** wordt een zender gebruikt die hoogfrequente geluidstrillingen (0,5-25 MHz) uitzendt. De trillingen worden, na reflectie, door een ontvanger opgevangen. Soms zijn zender en ontvanger gecombineerd in één taster. Scheuren of holten reflecteren de trillingen, evenals de achterzijde van het materiaal. De reflecties kunnen zichtbaar gemaakt worden op een oscilloscoop (zie figuur



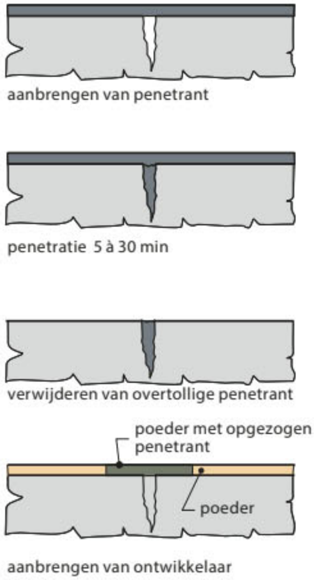
Figuur 12.32 Een X-stralenbeeld van een las kan de aanwezigheid van porositeiten in de lasnaad zichtbaar maken



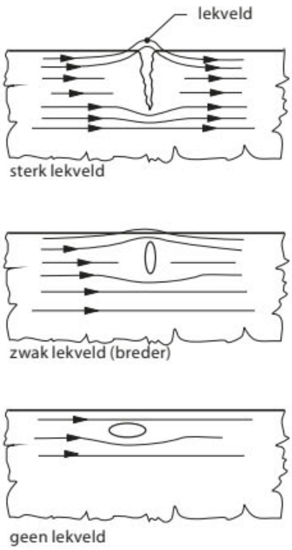
Figuur 12.33 Ultrasoon onderzoek

12.33). Op de horizontale tijd-as zijn van links naar rechts de zendpuls *Z*, de foutecho *F* en de bodemecho *B* zichtbaar. De methode is dus ook geschikt voor het meten van de materiaaldikte.

Penetrant onderzoek (zie figuur 12.34) is geschikt voor het detecteren van oppervlaktescheuren. Het is toepasbaar voor alle materiaalsoorten. Een gekleurde vloeistof met een lage oppervlaktespanning dringt door in de scheuren. Na verwijderen van de overtollige penetrant wordt de **ontwikkelaar** aangebracht, een fijn poeder gesuspendeerd in een vluchtige vloeistof. Na verdamping van de vloei-



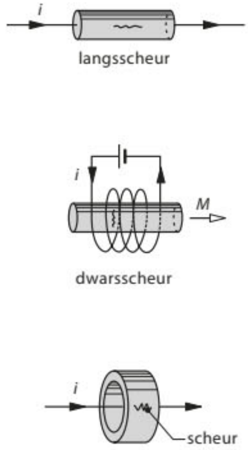
Figuur 12.34 Penetrant onderzoek



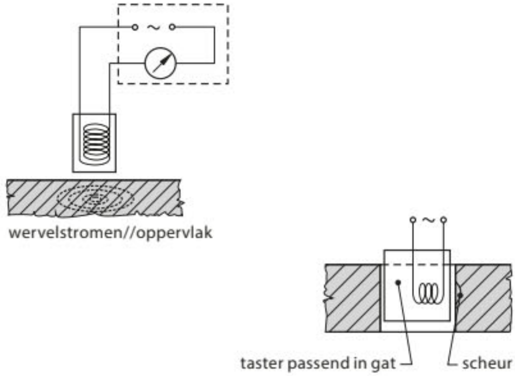
Figuur 12.35 Magnetisch onderzoek

stof blijft het poeder achter. Dit poeder zuigt de penetrant uit de scheur, die zichtbaar wordt als een gekleurde lijn in het witte poeder.

Magnetisch onderzoek is alleen toepasbaar voor het opsporen van fouten aan of direct onder het oppervlak in ferromagnetische materialen. In het werkstuk wordt een magnetisch veld opgewekt, bijvoorbeeld door magnetische inductie. De richting



Figuur 12.36 Afstemming van de richting van het magneetveld op de verwachte richting van de scheur



Figuur 12.37 Wervelstroomonderzoek

van het magnetische veld *M* staat loodrecht op de stroom *i*. Verstoringen in het magnetisch veld kunnen worden veroorzaakt door een holte of een scheur. Deze verstoringen worden zichtbaar gemaakt door over het voorwerp olie met daarin gesuspendeerd ijzerpoeder te gieten. In de omgeving van een scheur wordt het patroon dat het ijzerpoeder aanneemt verstoord (zie figuur 12.35). De waarneembaarheid kan worden verbeterd door het ijzerpoeder fluorescerend te maken en het geheel te belichten met ultraviolet licht. Scheuren die in de richting van het magneetveld lopen verstoren het magneetveld niet en zijn dus niet te vinden. De richting van het magneetveld moet dus worden gekozen op basis van de (verwachte) richting van de scheur (zie figuur 12.36).

Wervelstroomonderzoek is geschikt voor elektrisch geleidende materialen. De taster bevat een spoeltje dat wordt gevoed met wisselstroom (50 Hz-5 MHz). Dit wekt een wisselend magnetisch veld op dat wervelstromen in het onderliggende materiaal induceert. De wervelstromen beïnvloeden op hun beurt de stroom in de spoel (zie figuur 12.37). De sterkte van de wervelstroom hangt af van het geleidingsvermogen van het materiaal. Scheuren en holten nabij het oppervlak veranderen ter plaatse het geleidingsvermogen en zijn op deze wijze te detecteren.

Van de genoemde methoden heeft de wervelstroommethode het kleinste toepassingsgebied. De toepasbaarheid van de overige methoden hebben we samengevat in figuur 12.38. Voor alle vormen

Toepasbaarheid	NDO-methoden				
	Röntgen	Ultrasoon	Magnetisch	Penetrant	Wervelstroom
Materiaalsoorten	alle	vele	ferromagnetisch	alle	elektrisch geleidend
Materiaalfouten	inwendige fouten en oppervlaktescheuren	inwendige fouten en oppervlaktescheuren	oppervlaktescheuren	oppervlaktescheuren	oppervlaktescheuren en inwendige fouten dichtbij het oppervlak
Minimale foutgrootte	> 0,5 à 1% van de dikte	zeer klein (afh. van frequentie)	zeer klein	matig klein	klein
Toelaatbare werkstukvorm	vrij willekeurig	niet te onregelmatig	vrij willekeurig	vrij willekeurig	willekeurig
Benodigde ervaring	veel	veel	beperkt	beperkt	veel
Kosten	vrij hoog	vrij hoog	beperkt	gering	beperkt
Documentatie	direct	indirect	direct	direct	indirect

Figuur 12.38 Toepasbaarheid van NDO-methoden

van NDO geldt dat de keuze van de methode, de uitvoering ervan en de interpretatie van de resultaten veel kennis van zaken en ervaring vereisen. Bij het ontbreken daarvan is het aan te bevelen in NDO gespecialiseerde firma's in de arm te nemen. Soms wordt dit door keuringsinstanties ook voorgeschreven.

12.10 Kwaliteit van meetmiddelen

Om de kwaliteit van een product of een proces te kunnen waarborgen, moet de kwaliteit van de meetmiddelen gewaarborgd zijn. Dit betekent dat de meetmiddelen regelmatig moeten worden gecontroleerd volgens in normen vastgelegde voorschriften. In het hele stelsel van nationale en internationale normen voor de **geometrische productspecificatie** (**GPS**) zijn voor alle geometrische eigenschappen (zoals maat, afstand, radius, hoek en ruwheid) steeds **normketens** te herkennen. Deze normketens bestaan uit zes schakels, te weten:
- aanduidingen in productdocumentatie;
- definitie van toleranties;
- definitie van werkelijk kenmerk;
- bepaling van werkstukafwijkingen;
- eisen aan meetapparatuur;
- kalibratie van meetapparatuur.

Alleen door aandacht te besteden aan alle schakels van de normketen kan men een ondubbelzinnig verband leggen tussen de aanduiding op de tekening en de werkelijke waarde.

Meetinstrumenten moeten aan in normen vastgelegde eisen voldoen en met vaste tussenpozen worden gekalibreerd. De kalibratie vindt plaats met behulp van herleidbare standaarden voor de betreffende grootheid, die een orde van grootte nauwkeuriger zijn dan de meetinstrumenten zelf. Op hun beurt moeten ook de meetstandaarden aan een controle worden onderworpen. Dit gebeurt op eenzelfde wijze. Vaak zal het nodig zijn hiervoor een erkend meetinstituut in te schakelen. Uiteindelijk moet de kalibratie terug te voeren zijn op internationale standaarden.

Samenvatting

De meest relevante maatstaf voor kwaliteit is de tevredenheid van de afnemers. Om kwaliteit te kunnen garanderen is het nodig dat de gehele organisatie actief bij de kwaliteitsbeheersing wordt betrokken: alle medewerkers van het bedrijf of de instelling, van laag tot hoog.

Het verwerven van een kwaliteitscertificaat vraagt om grote inspanningen, maar blijkt in toenemende mate onmisbaar te zijn voor het verwerven van klanten.

Binnen de Europese Unie mogen vele categorieën producten, waaronder machines, alleen worden geleverd wanneer ze zijn voorzien van een CE-markering. Dit keurmerk geeft aan dat het product voldoet aan gestelde eisen op het gebied van veiligheid, gezondheid en milieu. EU-lidstaten zijn verplicht alle producten die van dit keurmerk zijn voorzien toe te laten.

Het beheersen van de kwaliteit zal vrijwel altijd tot een lager kostenniveau leiden. Door statistische procesbeheersing is de hoogst mogelijke kwaliteit tegen minimale kosten te bereiken.

Het stelsel van normen voor de geometrische productspecificatie is een onmisbaar hulpmiddel bij het beheersen en het verbeteren van de kwaliteit. De geometrische eisen, de vorm, de massa en het materiaal van het product bepalen de keuze van het meetproces. Dit doen ze samen met de meetomgeving, de vereiste meetonzekerheid en de meetsnelheid.

Voor de beoordeling van de integriteit van het werkstuk of het werkstukmateriaal bieden de niet-destructieve onderzoekmethoden een goede oplossing.

Literatuur

12.1 Kalpakjian, S., Schmid, S.R., *Manufacturing Engineering and Technology*, 7th edition (SI), Pearson, 2014, ISBN 978-98-1069-406-7. Hoofdstuk 33 'Surface roughness and measurement: friction, wear and lubrication'; Hoofdstuk 35 'Engineering metrology and instrumentation'; hoofdstuk 36 'Quality assurance, testing and inspection'.

12.2 Bakker, C.G., Meertens, E., *Integrale kwaliteitszorg en verbetermanagement*, Noordhoff Uitgevers BV, 2010, ISBN 978-90-0177-554-4.

12.3 C.A.J. Simons, H.J. de Vries, *Standaard of maatwerk*, Academic Services, 2002, ISBN 978-90-5261-430-4.

12.4 Maldegem, A.H.C. van, Beekum, C.J. van, *Leerboek fysische meettechniek*, 2e druk, Noordhoff Uitgevers BV, ISBN 978-90-0156-974-7.

12.5 Vink, W.J.P., *Niet-destructief onderzoek*, 3e druk, VSSD, 2004, ISBN 978-90-4071-147-3.

Symbolenlijst

Symbool		Omschrijving	Eenheid
a	=	Bekende systematische afwijking	[-]
C_p	=	Proceshaalbaarheid	[-]
C_{pk}	=	Maat voor de grootte en de ligging van de spreiding	[-]
l	=	Basislengte bij meting van ruwheid	[mm]
L	=	Meetlengte bij meting van ruwheid	[mm]
n	=	Aantal waarnemingen van een steekproef	[-]
R	=	Spreiding van een steekproef	[*]
R_a	=	Gemiddelde ruwheid	[µm]
R_t	=	Maximale ruwheidshoogte	[µm]
R_z	=	Ruwheidshoogte	[µm]
R_{z5}	=	Gemiddelde ruwheidshoogte	[µm]
s	=	Standaardafwijking van een steekproef	[*]
T	=	Grootte van een tolerantieveld	[*]
$T\uparrow$	=	Bovenste tolerantiegrens	[*]
$T\downarrow$	=	Onderste tolerantiegrens	[*]
U	=	Meetonzekerheid	[*]
U_m	=	Meetonnauwkeurigheid	[*]
W	=	Correctiefactor voor meetonnauwkeurigheid	[-]
$\bar{x}$	=	Gemiddelde van een steekproef	[*]
x_i	=	Waarneming met rangnummer i	[*]
Y_g	=	Meetresultaat	[*]
Y_m	=	Zuiver meetresultaat	[*]
Y_w	=	Werkelijke waarde van een meetgrootheid	[*]
δ	=	Systematische afwijking	[-]
ε	=	Toevallige afwijking	[-]
σ	=	Standaardafwijking van een populatie	[-]

* de eenheden zijn afhankelijk van de betreffende gemeten grootheid

Oefenvragen

12.1 Geef enkele voorbeelden van een robuust ontwerp.

12.2 Maak een visgraatdiagram voor het analyseren van een verkeersongeval waarbij een automobilist geen voorrang verleent.

12.3
a Wat is proceshaalbaarheid, en welke eisen worden aan proceshaalbaarheid gesteld?
b Waarom is voor een statistisch beheerst proces vaak een proceshaalbaarheid groter dan 1 gewenst?
c Teken een situatie waarvoor geldt dat $C_{pk} = 1$.

12.4 Schets een $\bar{x}$-*R*-kaart. Wat is de betekenis van $\bar{x}$ en *R*? Hoe wordt de kaart gebruikt?

12.5 Wat zijn de nadelen van het gebruik van kalibers bij de kwaliteitsbeheersing? Wat zijn de redenen dat ze toch nog steeds worden toegepast?

12.6 Vergelijk het toepassingsgebied van ultrasoon scheuronderzoek met dat van magnetisch scheuronderzoek.

inclusief website!

Op www.industrieleproductie.nl vind je de antwoorden op deze vragen, maar ook extra studie- en oefenmateriaal, zoals video's en meer opgaven.

13 Productiemachines en automatisering

In dit hoofdstuk verklaren we de opbouw van productiemachines aan de hand van de door de bewerking gestelde eisen.
We behandelen de begrippen starre en flexibele automatisering, en geven de toepassingsgebieden daarvan aan.
We beschrijven de werking van numeriek bestuurde machines, van de daarop gebaseerde flexibele fabricagesystemen en van industriële robots.
We geven de principes weer van het programmeren van deze werktuigen.

13.1 Functie-eisen, mechanische en kinematische opbouw

Bewerkingsmachines bezitten een typische vorm en opbouw, afhankelijk van het bewerkingsproces waarvoor ze bestemd zijn. De volgende factoren bepalen de statische en kinematische structuur van de diverse typen machines:
- de belasting door de optredende krachten, het voor de bewerking vereiste vermogen en de daarmee samenhangende warmteontwikkeling;
- de productvorm en de gewenste mogelijkheden van informatieoverdracht door het werktuig. Een en ander hangt mede af van de vraag in hoeverre de vorm van het product is vastgelegd in de toe te passen gereedschappen;
- de benodigde stijfheid en demping in verband met het begrenzen van elastische vervormingen en trillingen;
- de nauwkeurigheidseisen die aan het bewerkingsproces worden gesteld;
- de toegankelijkheid in verband met het opspannen van werkstukken en gereedschappen;
- de gewenste cyclustijd en de daarmee samenhangende bewegingssnelheid.

Figuur 13.1 geeft een vergelijkend overzicht van een aantal karakteristieke proceskenmerken. In figuur 13.2 zie je het relatieve belang van de eisen die op basis van de kenmerken uit figuur 13.1 worden gesteld aan de verschillende soorten machines.

Daarnaast is het van belang dat de werktuigen het aanpassingsvermogen bezitten om zo veel mogelijk verschillende productvormen te kunnen realiseren en verschillende materiaalsoorten te kunnen bewerken.

Kenmerken → / Bewerkingsproces ↓	Specifieke arbeid	Gelijktijdig bewerkt volume	Benodigd vermogen	Grootte bewerkingskracht
vonkerosie	xxxx	x	x	–
slijpen	xxx	xx	xx	x
frezen, draaien	xx	xxx	xxx	xx
omvormen	x	xxxx	x/xxx	xxx

– = geen, x = gering, xx = matig, xxx = hoog, xxxx = zeer hoog

Figuur 13.1 Overzicht van een aantal karakteristieke proceskenmerken voor het omvormen, verspanen en vonkerosie

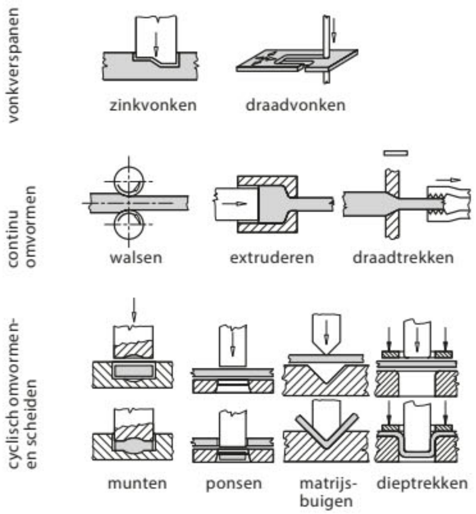
Eisen → / Bewerkingsproces ↓	Stijfheid	Sterkte	Nauwkeurigheid	Toegankelijkheid	Cyclustijd	Bewegingssnelheid
vonkerosie	x	–	xx/xxx	xx	x	x
slijpen	xx	x	xxx	xx	xx	xxx
frezen, draaien	xxx	x	xx/xxx	xx	xx	xxx
omvormen	xxxx	xxx	x/xx	x	xxx	xx

– = geen, x = gering, xx = matig, xxx = hoog, xxxx = zeer hoog

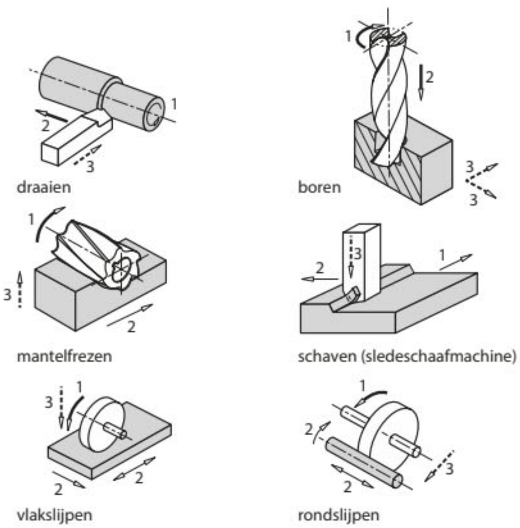
Figuur 13.2 Relatief belang van de eisen te stellen aan verschillende soorten productiemachines

Vanwege de grote productvariëteit in de enkel- en kleinseriefabricage brengt men het nodige aanpassingsvermogen aan in de gereedschapswerktuigen zelf. De vormgevingsmogelijkheden van deze universele gereedschapswerktuigen worden gerealiseerd door middel van langsbewegingen van sleden over rechtgeleidingen, al dan niet in combinatie met roterende bewegingen. De bewerking wordt in de regel uitgevoerd met standaardgereedschappen. In de massafabricage wordt de vormmogelijkheid gerealiseerd door productgebonden gereedschappen. Deze vaak complexe gereedschappen bevatten de vorminformatie van het product en zijn aanmerkelijk duurder dan de standaardgereedschappen die bij de universele gereedschapswerktuigen in gebruik zijn. Men bereikt flexibiliteit door deze gereedschappen op een doelmatige wijze te verwisselen en in te stellen.

Figuur 13.3 geeft aan welke gereedschapsbewegingen horen bij de belangrijkste niet-verspanende processen. Figuur 13.4 doet hetzelfde voor de verspanende bewerkingen. Figuur 13.5 toont de kinematische structuren van de machines voor verspanende bewerkingen. De schuin gearceerde vlakken in deze figuur maken deel uit van de 'vaste wereld' en geven weer hoe verschillende machinecomponenten bewegen ten opzichte van het machineframe. Deze componenten kunnen we primair onderverdelen in **sleden** voor translaties en **spillen** voor rotaties. Een **machinetafel** heeft primair een opspanfunctie en kan zowel vast als bewegend zijn.

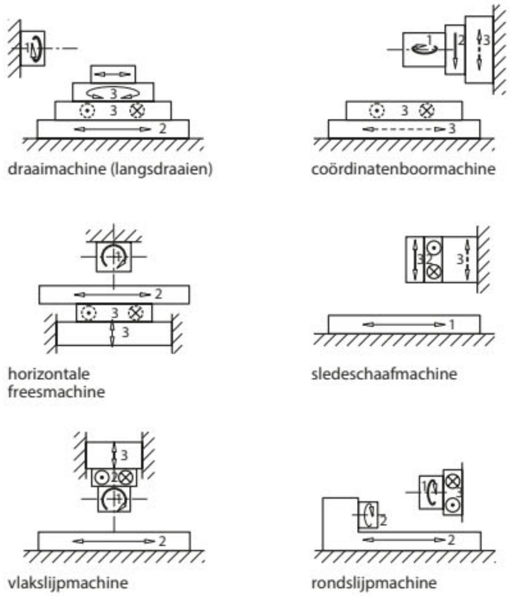


Figuur 13.3 Overzicht van de bewegingspatronen die horen bij niet-verspanende processen



1 hoofdbeweging
2 voedingsbeweging
3 instelbeweging

Figuur 13.4 Overzicht van de bewegingspatronen die horen bij de meest voorkomende verspanende bewerkingen



1 hoofdbeweging
2 voedingsbeweging
3 instelbeweging

Figuur 13.5 Kinematische structuur van machines voor verspanende bewerkingen

Meer samengestelde bewegende elementen leiden tot een geringere nauwkeurigheid. Dit komt mede door de verminderde stijfheid van de gehele constructie. Door een gunstige constructieve uitvoering kan de stijfheid aanzienlijk worden vergroot, met behoud van de benodigde vrijheidsgraden. Dit leidt in de regel tot duurdere ontwerpen, zwaardere machines en/of een groter benodigd vloeroppervlak. Het kan ook leiden tot een beperking van de gebruiksmogelijkheden.

Machinespecificatie

De keuze van een bewerkingsmachine is betrekkelijk eenvoudig indien men voor de uitvoering van een bepaalde taak uit een groep van aanwezige machines moet kiezen. Dit is bijvoorbeeld het geval bij de werkvoorbereiding (zie hoofdstuk 14) of bij de productieplanning (zie hoofdstuk 15). In deze gevallen is het aantal alternatieven beperkt en is het aantal kenmerken dat bepalend is voor de keuze klein. Het is een ander verhaal als er een nieuwe machine moet worden aangeschaft. Dan kan men immers in principe vrij kiezen uit alle machines die op de wereldmarkt worden aangeboden. De belangrijkste aandachtspunten bij een dergelijke keuze zijn:
- de hoofdafmetingen: de afmetingen van de werkruimte, de tafelafmetingen en de maximale tafelverplaatsingen, de maximale afmetingen van de gereedschappen;
- de minimale en de maximale waarden van spiltoerentallen en snijsnelheden, de maximale proceskrachten en het benodigde vermogen;
- de nauwkeurigheidsklasse in verband met de bewegingsnauwkeurigheid van de machine;
- de automatiseringsgraad, dit betreft vooral eventuele aanvullende functies van de machine en zijn besturing;
- de ergonomische kenmerken: de aanpassing van de machine aan de mens wat betreft de werkhouding, de bedieningsorganen, de veiligheid, de geluidshinder, de bescherming tegen spanen, koel- en smeermiddelen enzovoort.

13.2 Starre automatisering

13.2.1 Redenen voor automatisering

In hoofdstuk 5 (over verspanende bewerkingen), hebben we laten zien dat de die tijd nodig is voor het verwijderen van een gegeven hoeveelheid materiaal zeer sterk is afgenomen. Dit heeft verschillende oorzaken, maar komt vooral door de ontwikkeling van de moderne snijmaterialen. Dit betekent echter niet dat de totale tijd die nodig is voor de bewerking van een onderdeel, de **cyclustijd**, in dezelfde verhouding is afgenomen. Behalve de tijd dat het snijgereedschap werkelijk snijdt, de **hoofdtijd**, is er immers ook tijd nodig voor een groot aantal ondersteunende handelingen, de **neventijden**.
Voorbeelden hiervan zijn:
- het bestuderen van tekeningen en werkinstructies;
- het verzamelen van de benodigde hulpmiddelen;
- het instellen van de machine voor het maken van een bepaald product;
- het op- en afspannen van de werkstukken;
- het wisselen van gereedschappen;
- het tussentijds meten van het werkstuk;
- het bijstellen van het snijgereedschap.

Het merendeel van deze handelingen betreft het invoeren van informatie over het product en het productieproces in de machine.
Hierbij moeten we onderscheid maken tussen de eenmalige activiteiten aan het begin van het fabricageproces, de **inrichttijd** of **steltijd**, en de bij elk werkstuk van een serie terugkerende handelingen, de **cyclische neventijd**.
Bij de kleinseriefabricage met handbediende gereedschapswerktuigen blijken de neventijden vaak 75%-85% van de totale bewerkingstijd in beslag te nemen. Het heeft weinig zin in deze situatie om veel moeite te doen de snijtijden nog verder te verminderen. Er valt immers veel meer te verdienen met het beperken van de neventijden.

Automatisering richt zich daarom in de eerste plaats op de bijkomende handelingen, en dan vooral op de handelingen die voor ieder werkstuk terugkomen. Wanneer deze geheel of grotendeels zijn geautomatiseerd, kan men er vervolgens ook nog naar streven om meerdere bewerkingen gelijktijdig te laten plaatsvinden.
Iets dergelijks geldt in principe ook voor de niet-verspanende bewerkingen, zij het in aanzienlijk mindere mate. Bij niet-verspanende bewerkingen is de informatie over product en proces veel meer in het gereedschap en de eenmalige instelling van het gereedschapswerktuig vastgelegd.

Automatisering is in alle gevallen feitelijk gericht op een efficiënt hergebruik van informatie. Hiervoor

komen de cyclisch verlopende processen het eerst in aanmerking. Daarom zullen we automatisering allereerst behandelen aan de hand van verspanende bewerkingen. We nemen hierbij de draaibewerking als voorbeeld.

13.2.2 Starre automatisering van draaimachines

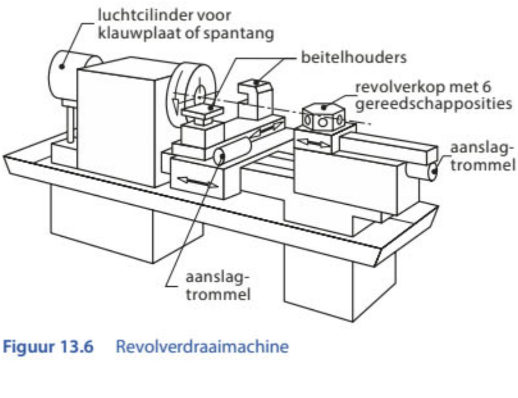
De draaimachine is het meest voorkomende verspanende gereedschapswerktuig. Draaidelen hebben een betrekkelijk eenvoudige geometrie en worden vaak in grote (soms zelfs zeer grote) aantallen vervaardigd. In verband met uitwisselbaarheid (zie paragraaf 11.1) van producten zijn de nauwkeurigheidseisen vaak betrekkelijk hoog. Het automatiseren van het draaien is vrij eenvoudig uit te voeren en mede daardoor in veel gevallen economisch verantwoord. Vandaar dat de automatisering hiervan al een lange historie heeft en ver is voortgeschreden.

De centerdraaimachine

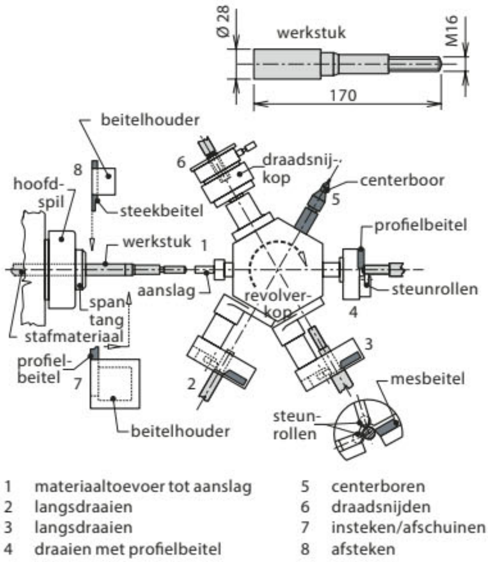
Om didactische redenen gaan we hier uit van de handbediende centerdraaimachine (zie paragraaf 5.7.3). De draaier moet de machine instellen, de juiste gereedschappen kiezen, de verspaningscondities instellen en de gereedschappen langs het product sturen. Dit doet hij aan de hand van de werkstuktekening met de afmetingen van het product, en aan de hand van werkinstructies of eigen vakmanschap. Dit machinetype is in een aantal stappen zeer vergaand geautomatiseerd.

De revolverdraaimachine

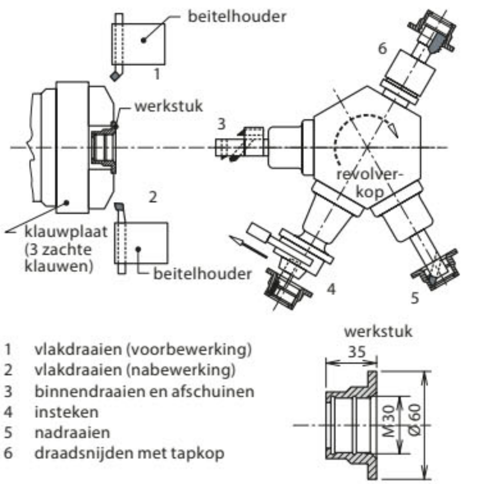
De eerste stap betrof het elimineren van het steeds weer wisselen en instellen van de verschillende



Figuur 13.6 Revolverdraaimachine



Figuur 13.7 Bewerking van een as met een revolverdraaimachine. Uitgangsmateriaal: staf



Figuur 13.8 Bewerking van een deksel met een revolverdraaimachine. Uitgangsmateriaal: gietstuk

gereedschappen door het ontwikkelen van de **revolverdraaimachine**. De losse kop van de centerdraaimachine werd hierbij vervangen door een **indexerende gereedschapshouder**. Deze houder, de **revolverkop**, kan nauwkeurig in 6-12 verschillende standen worden gedraaid.
In elke positie komt één gereedschap (soms een combinatie van enkele gereedschappen) in zijn werkstand. De neus van bijvoorbeeld een draai-

beitel wordt op een vaste positie ten opzichte van de revolverkop ingesteld. Deze beweegt alleen evenwijdig aan de centerlijn van de machine. De verplaatsing van de kop wordt voor elke positie begrensd door instelbare aanslagen. Op deze wijze liggen de draaidiameter en draailengte vast (zie figuur 13.6).
Naast draaibeitels kunnen ook boren, draadsnijgereedschappen en dergelijke in de revolverkop geplaatst worden. De dwarsslede van de centerdraaimachine wordt alleen gebruikt voor insteken en vlakdraaien. In figuur 13.7 en 13.8 zie je twee voorbeelden van toepassingen.

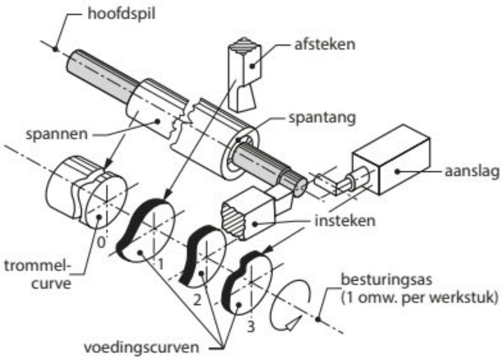
Bij de revolverdraaimachine is de bedieningsfunctie sterk vereenvoudigd. Wanneer de machine eenmaal is ingesteld, rest nog slechts het bewegen van de sleden en van de revolverkop, het schakelen van de verschillende toerentallen en het verwisselen van de producten.

De draaiautomaat

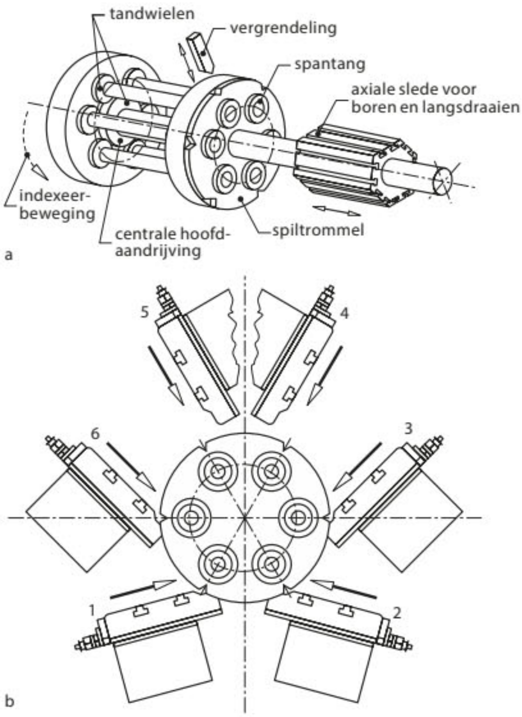
Het ligt voor de hand om het bewegen van de sleden en van de revolverkop, het schakelen van de verschillende toerentallen en het verwisselen van de producten ook te mechaniseren. Bij de **draaiautomaat** worden de verschillende handelingen gestuurd met **nokken** en **curvenschijven** (zie figuur 13.9), of door een trommel met instelbare nokken, die schakelaars bedienen. Het product wordt uit stafmateriaal gemaakt en de machine wisselt het product automatisch door het af te steken en het stafmateriaal door te schuiven.

De meerspilautomaat

Bij de revolverdraaimachine en de draaiautomaat doen de verschillende gereedschappen na elkaar hun werk. Na een volledige bewerkingscyclus is er dus één product gereed. Voor zeer grote productaantallen bestaan **meerspilautomaten**, automaten die met meerdere (meestal 4-8) spillen zijn uitgerust (zie figuur 13.10). Deze spillen zijn opgenomen in een indexerende trommel. Tegenover de trommel is een slede met gereedschappen geplaatst. Na elke stap van de trommel maakt de slede een axiale heen en weer gaande beweging waarbij alle gereedschappen tegelijk in actie komen. Daarnaast zijn er nog verschillende sleden met gereedschappen voor in- en afsteekbewerkingen op de vaste kop aangebracht. Nu is na



Figuur 13.9 Besturing draaiautomaat met curvenschijven



Figuur 13.10 Meerspilautomaat: spiltrommel en axiale gereedschapslede (a), sleden voor in- en afsteekbewerkingen (b)

elke stap een product gereed, dus 4-8 producten na een volledige cyclus. Meerspilautomaten werken uitsluitend met stafmateriaal.

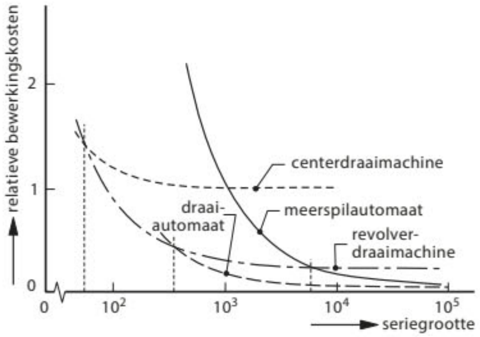
Figuur 13.11 geeft een vergelijking van de kostencomponenten van de vier genoemde machinetypen. Het verloop van de kostprijs per product hebben we weergegeven in figuur 13.12. Uit de grafiek valt af te

lezen bij welke seriegrootte welk type machine moet worden gekozen.

Al deze vormen van automatisering houden in dat de productinformatie met mechanische hulpmiddelen (instelbare gereedschappen en aanslagen,

Soort draaimachine	Uurtarief	Eenmalige kosten	Inrichtkosten	Cyclische kosten
Centerdraaimachine				
Revolver-draaimachine	| stijgt	| stijgen	| stijgen	| dalen
Draai-automaat	↓	↓	↓	↓
Meerspilautomaat				

Figuur 13.11 Kostenverloop bij de toepassing van sterker geautomatiseerde draaimachines



Figuur 13.12 Kostprijs als functie van de seriegrootte voor verschillende draaimachines



Figuur 13.13 Buigautomaat voor massafabricage van draadproducten (YSM)

curven- en nokschijven, kopieermallen) aan de machine wordt toegevoerd. Het betreft informatie over de afmetingen van het product en de instelwaarden die de verspaningscondities bepalen, zoals snijsnelheid, snedediepte en voeding.
Het invoeren van informatie met mechanische middelen staat bekend als **starre** of **harde automatisering**.
Deze hulpmiddelen zijn voor één bepaald product bestemd. Het eenmalig ontwerpen en vervaardigen ervan brengt aanzienlijke kosten met zich mee. Ook het inrichten van de machine kost veel tijd en geld, omdat het voor elke fabricageserie opnieuw moet worden gedaan. Deze vorm van automatisering leent zich daarom vooral voor betrekkelijk grote en soms zeer grote aantallen producten.

We wijzen je er hier nogmaals op dat de automatisering van het draaien slechts als voorbeeld dient. Dezelfde principes gelden voor vele andere bewerkingen, zowel verspanende als spaanloze. Ook is het mogelijk zelf machines voor specifieke producten op te bouwen uit standaardcomponenten. Men spreekt dan van **low-cost automation**. In figuur 13.13 zie je een buigautomaat voor massafabricage, waarbij een groot aantal bewegingen mechanisch gecoördineerd wordt.

Met behulp van starre automatisering zijn hele industrietakken opgebouwd. Het ging, en gaat, hierbij steeds om massaproductie. De auto-industrie is het meest aansprekende voorbeeld. Door deze vorm van automatisering was het mogelijk industriële producten te leveren voor een prijs die voor een toenemend aantal mensen betaalbaar was. Men moest echter wel genoegen nemen met standaardproducten.

Producten die in kleinere aantallen gemaakt worden lenen zich minder goed of helemaal niet voor starre automatisering. Dit betekent dat de kostprijs van dergelijke producten onevenredig veel hoger is dan bij massaproducten. De fabricage van kleine en middelgrote series vraagt dus om een andere oplossing, die we in de volgende paragraaf zullen bespreken.

13.3 Flexibele automatisering

Starre automatisering hebben we in paragraaf 13.2 gedefinieerd als het aan de machine toevoeren van de productinformatie (geometrie en technologie)

met mechanische hulpmiddelen. Kenmerkend daarbij zijn de hoge eenmalige en per serie terugkerende kosten.
Bij **flexibele automatisering** wordt de informatie met behulp van een gemakkelijk verwisselbare informatiedrager aan de machine toegevoerd. Hoewel dit in principe niet nodig is, vindt de verwerking van de informatie vrijwel steeds plaats met behulp van computers. Het invoeren van de informatie gebeurt door de gegevens over het product en het fabricageproces te coderen. Dit heeft geleid tot de term **numerieke besturing**, meestal aangeduid met de afkorting **NC (numerical control)**.

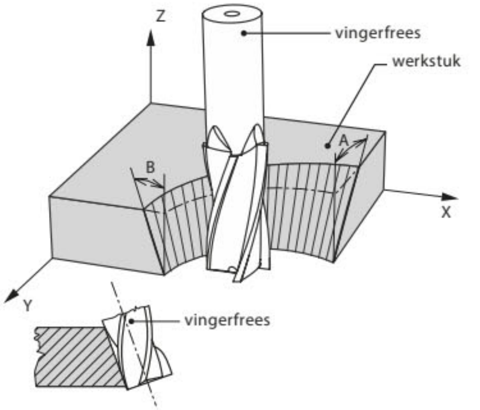
Numerieke besturing zorgt er allereerst voor dat de per serie terugkerende kosten, de **inrichtkosten**, flink lager worden. De eerste stap in het proces is het omzetten van de informatie van de werkstuktekening in een code die leesbaar is voor de besturing van de machine. Dit noemen we **programmeren**. Programmeren was aanvankelijk een langdurig en kostbaar proces. Door verschillende ontwikkelingen zijn de kosten hiervan inmiddels aanzienlijk gedaald (we zullen deze ontwikkelingen later in dit hoofdstuk behandelen). Dit betekent dat deze techniek geleidelijk voor steeds kleinere productaantallen een economisch verantwoorde oplossing biedt.

Behalve het productaantal is er nog een tweede parameter die bepalend is voor de toepassing van flexibele automatisering: de **moeilijkheidsgraad** of het **afkeurrisico** van een product of van een proces. De moeilijkheidsgraad kan hoog zijn doordat:
- er veel vorminformatie moet worden verwerkt. De vormen kunnen hierbij op zichzelf eenvoudig zijn, bijvoorbeeld bij een plaat met een groot aantal gaten (zie figuur 13.14),
- de vormen van het product een ingewikkelde sturing van het gereedschap vereisen (zie bijvoorbeeld figuur 13.15),
- een zeer grote nauwkeurigheid wordt gevraagd. Het is een wijdverbreid misverstand dat automatisch werkende machines in principe nauwkeuriger zijn dan handbediende. De winst wordt verkregen doordat automatisch werkende machines spreiding veroorzaakt door menselijke invloeden uitschakelen en vergissingen voorkomen.

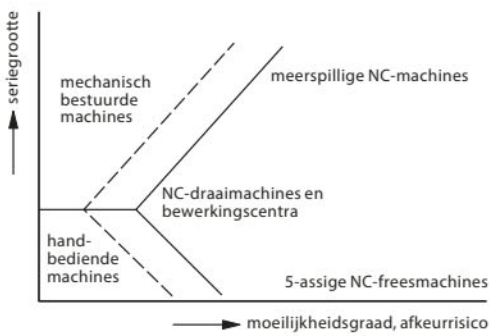
Bij een eenvoudig product is het afkeurrisico hoog wanneer het product zeer grote afmetingen heeft



Figuur 13.14 Vervaardiging van een pijpplaat voor een warmtewisselaar (Galbiati)



Figuur 13.15 Complexe geometrie vereist 5 bestuurde assen



Figuur 13.16 De K-grafiek

of het uitgangsmateriaal zeer kostbaar is. Ook hier zit het voordeel van automatisering in het elimineren van de kans op menselijke fouten. Als een bedieningsman heel even zijn concentratie verliest, kan een product al onherstelbaar beschadigd raken.

In figuur 13.16 hebben we de toepassing van flexibele automatisering samengevat. De seriegrootte is in deze grafiek verticaal uitgezet en de moeilijkheidsgraad horizontaal. De schuine lijnen geven de begrenzing van het toepassingsgebied van flexibele automatisering aan. Deze grafiek staat bekend als de **K-grafiek**, genoemd naar de vorm van de begrenzingslijnen.
Door de voortschrijdende ontwikkeling van de machinebesturingen en de techniek van het programmeren verplaatsen de lijnen zich in de loop van de tijd naar links, zoals we in figuur 13.16 met stippellijnen hebben aangegeven. Dit betekent dat het belang van flexibele automatisering geleidelijk toeneemt. Bij de draaimachines is de revolverdraaimachine inmiddels nagenoeg van het toneel verdwenen, zeker waar het de verkoop van nieuwe machines betreft.

Tegelijkertijd moeten we opmerken dat er altijd een toepassingsgebied zal overblijven voor de handbediende machines en de star geautomatiseerde machines. Deze gebieden zijn respectievelijk linksonder en linksboven in de K-grafiek te vinden.

13.4 De opkomst van NC-machines

In paragraaf 13.3 hebben we de nadruk gelegd op de economische redenen voor het ontwikkelen van numerieke besturing. In eerste instantie werd deze techniek echter ontwikkeld voor de fabricage van producten, die niet of nauwelijks op een andere manier konden worden gemaakt. Moeilijk te definiëren vormen en steeds hogere nauwkeurigheidseisen waren met de toen bestaande technieken zeer moeilijk te bereiken. Vooral het kopieerfrezen, waarbij de vorm werd verkregen door het aftasten van een model van het product, schoot tekort.
In 1952 werd bij het Massachusetts Institute of Technology (MIT) de eerste NC-freesmachine gebouwd. Hiermee werd meteen het moeilijkste probleem aangepakt: het frezen van driedimensionale contouren.

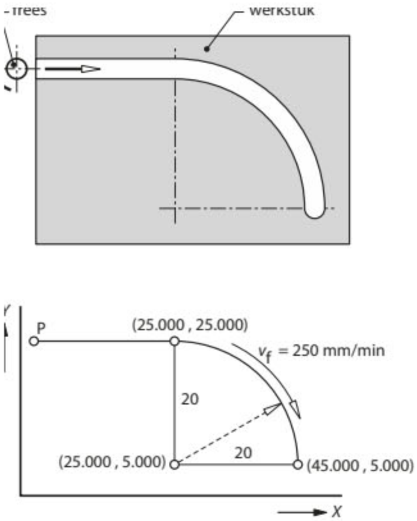
In een vroeg stadium van de ontwikkeling van numeriek bestuurde bewerkingsmachines bleek dat het maken van de werkstukprogramma's een ernstige belemmering vormde. Daarom startte men al vroeg met de ontwikkeling van een speciale programmeertaal, bestemd voor het maken van werkstukprogramma's: APT (Automatically Programmed Tools). Natuurlijk moest ook hier meteen het bewerken van driedimensionale oppervlakken worden aangepakt. De eerste versie van deze taal kwam in 1961 ter beschikking. De codering van deze taal wordt nog steeds gebruikt. Het programmeren behandelen we in paragraaf 13.7.

Door de opkomst van de micro-elektronica in dezelfde periode namen de mogelijkheden en de betrouwbaarheid van de besturingen zeer sterk toe. Men baseerde het ontwerp ervan op een microcomputer. Hierdoor ontstonden mogelijkheden om programma's op verschillende manieren in te voeren, te wijzigen en op te slaan. Door gebruik te maken van de rekencapaciteit van de computer werd het mogelijk het programmeren sterk te vereenvoudigen. Dit noemt men **CNC (computer numerical control)**.

13.5 Het principe van NC-machines

De gegevens over het werkstuk, de geometrie en de technologie worden verwerkt in het **programma**. Het programma bestaat uit een alfanumerieke tekst die wordt vastgelegd op een **informatiedrager**. De besturing van de machine splitst de informatie in **bewegingsinformatie** en **schakelinformatie**. Bewegingsinformatie stuurt de verplaatsingen van de machine. Schakelinformatie stuurt onder meer het schakelen van toerentallen, de verwisseling van gereedschappen en het aan- en uitzetten van de koeling.

Laten we dit illustreren met een voorbeeld. In figuur 13.17 is te zien dat bij een freesbewerking de relatieve beweging tussen het gereedschap en het product is samengesteld uit twee orthogonale sledebewegingen langs de X-as en de Y-as. (Zie voor de aanduiding van de bewegingsassen van productiemachines ISO 841:2001.) Deze sledeverplaatsingen moeten vanuit de besturing tegelijkertijd en gecoördineerd worden gestuurd. Op deze manier kan elke willekeurige contour in het XY-vlak worden beschreven. Het bewegingsverloop van figuur 13.17 kan als volgt worden omschreven:

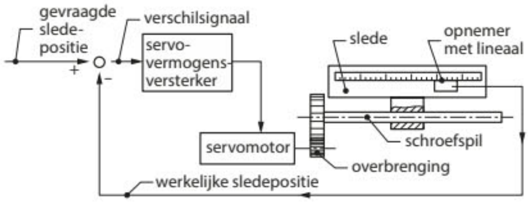


N09	G01	X25.000	Y25.000	F250.0	
N10	G02	X45.000	Y 5.000	I25.000	J5.000

Figuur 13.17 Het frezen van een contour: werkstuk (a) en gereedschapsbaan (b)

Ga vanuit beginpunt P langs een rechte lijn (commando 'G0l') naar het punt met de coördinaten X = 25.000 en Y = 25.000 en vervolgens met de klok mee langs een cirkelboog (commando 'G02') met middelpunt I = 25.000, J = 5.000 tot aan het punt X = 45.000, Y = 5.000. (Maten in mm, kleinste programmeerbare stap 0,001 mm.) Deze beweging moet worden uitgevoerd met een snelheid van 250 mm/minuut (F = 250.0).

De vereiste nauwkeurigheid vereist de gevraagde en de werkelijke positie met elkaar te vergelijken met behulp van een **positiemeetsysteem**. Het verschilsignaal wordt omgezet in elektrische pulsen die de servomotoren aansturen. Deze bewegen de sleden van de machine tot de fout is weggeregeld. Iedere puls vertegenwoordigt een verplaatsing van (in dit geval) 1 μm. Deze besturing staat bekend als een regelsysteem met **terugkoppeling** (zie figuur 13.18). Daarnaast moet de besturing ervoor zorgen dat de snelheden in X- en Y-richting steeds resulteren in de geprogrammeerde baansnelheid van 250 mm/min. Behalve een positieregelkring is er dus ook een snelheidsregelkring aanwezig (niet afgebeeld in figuur 13.18).
In de rest van deze paragraaf worden de belangrijkste elementen uit deze figuur nader besproken.



Figuur 13.18 Positieregeling met terugkoppeling

Bij de eerste generatie numeriek bestuurde machines werd de ponsband als informatiedrager gebruikt. Nadien werden andere media, zoals de cassetteband en de diskette, toegepast. Deze waren gemakkelijker te hanteren, maar hadden vaak last van elektromagnetische storingen, zoals die in de werkplaatsomgeving voorkomen. De modernste oplossing is een rechtstreekse lijnverbinding met een computer, die als opslagmedium voor een groot aantal programma's fungeert. Deze werkwijze staat bekend als **DNC (distributed numerical control)**.

13.5.1 Besturing

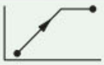
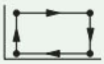
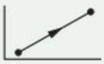
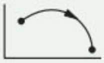
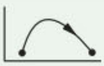
Besturingen van NC-machines zijn te onderscheiden naar de wijze van interpolatie en het aantal bestuurde assen. Figuur 13.19 geeft een overzicht van de verschillende besturingssystemen. Er zijn drie principieel verschillende werkwijzen te onderscheiden: punt-, lijn- en contourbesturing.

Puntbesturing

Bij **puntbesturing** wordt geen **interpolatie** (het berekenen van de posities tussen twee geprogrammeerde punten) toegepast en de bewegingssnelheid wordt niet bestuurd. Het gereedschap beschrijft een in principe willekeurige baan van het huidige naar het volgende geprogrammeerde punt. Deze besturing is uitsluitend geschikt voor positioneerbewegingen, zoals bij boor- of ponsmachines.

Lijnbesturing

Ook bij **lijnbesturing** is er geen sprake van interpolatie. De beweging van het gereedschap geschiedt uitsluitend evenwijdig aan een van de assen, maar wel met een bestuurde voedingssnelheid. Met deze besturing zijn eenvoudige frees- en draaibewerkingen mogelijk. In de praktijk wordt deze vorm van besturen nauwelijks meer toegepast.

Besturingstype	Beweging	Kenmerk	Typische applicaties
Puntbesturing		positioneren	– boormachines – eenvoudige industriële robots
Lijnbesturing		voeding bestuurd in één as tegelijk	– eenvoudige freesmachines
Contourbesturing		voeding in meer assen simultaan en gecoördineerd bestuurd	
lineaire interpolatie		langs een rechte lijn	– eenvoudige draai- en freesmachines – het merendeel van de industriële robots
circulaire interpolatie		langs een cirkelboog	– freesmachines – draaimachines – tekenmachines – brandsnijmachines
hogere-orde-interpolatie		langs een parabool, hogere-graads kromme of splines	– contourfrezen in drie of meer assen (profiel)

Figuur 13.19 Overzicht van de elementaire besturingssystemen

Contourbesturing

Met een **contourbesturing** of **baanbesturing** kan het gereedschap een willekeurige baan beschrijven met een bestuurde voedingssnelheid. De vormgevingsmogelijkheden van dergelijke besturingen worden verder bepaald door het aantal bestuurde assen. Voor het interpoleren zijn er drie mogelijkheden:
- **lineaire interpolatie**: het gereedschap beweegt langs een rechte lijn tussen twee geprogrammeerde punten;
- **circulaire interpolatie**: het gereedschap beschrijft een cirkelboog tussen twee geprogrammeerde punten. De straal en oriëntatie van de cirkelboog worden gewoonlijk bepaald door het invoeren van de coördinaten van het middelpunt;
- **hogere-orde-interpolatie**: de gereedschapsbaan wordt gedefinieerd als een parabool of een hogeregraadskromme.

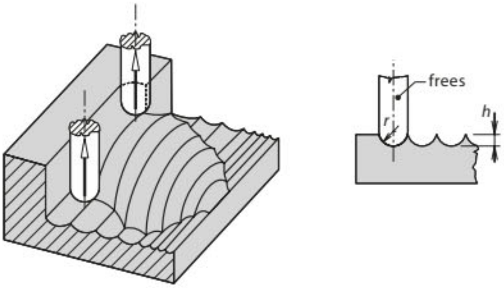
Met elk van deze drie methoden zijn willekeurige contouren te beschrijven. Bij lineaire interpolatie moet men voor een nauwkeurige benadering echter een zeer groot aantal punten invoeren. Bij hogere-orde-interpolatie is de vereiste hoeveelheid invoer veel kleiner.

Aantal bestuurde assen

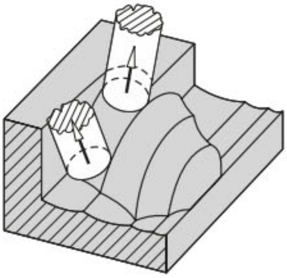
Bij het draaien beschrijft de beitelpunt een baan in een vlak door de hartlijn van de draaimachine. Hiervoor zijn slechts twee bestuurde assen nodig, de X- en de Z-as. De Z-as is evenwijdig aan de rotatieas van het werkstuk.
Voor freesbewerkingen evenwijdig aan het XY-vlak is een positioneerbeweging in Z-richting (evenwijdig aan de rotatieas van het gereedschap) nodig. Dit vereist de aanwezigheid van drie gestuurde assen, maar interpolatie en geprogrammeerde voedingssnelheid zijn alleen nodig voor bewegingen in het XY-vlak.
Men spreekt in dit verband wel van een $2^{1}/_{2}$D-besturing, ook wanneer de besturing naar keuze kan interpoleren in het XY-, YZ- of XZ-vlak. Voor een groot deel van alle te frezen producten is een $2^{1}/_{2}$D-besturing voldoende.

Voor het bewerken van willekeurige vormen, schuine vlakken, regel- en dubbelgekromde vlakken, zijn tenminste drie assen nodig, die gecoördineerd gestuurd kunnen worden. Dit vraagt om een volwaardige 3D-besturing. De vorm wordt vaak verkregen met een **bolkopfrees** (zie figuur 13.20).

Voor een nauwkeurige benadering van de gewenste vorm moeten de banen van de frees zeer dicht bij elkaar liggen. De **schulphoogte** *h* neemt af bij toenemende bolstraal *r* van de frees. Het gunstigste is dus een kopfrees. Wanneer deze wordt toegepast, moet de freesspil steeds loodrecht op het oppervlak van het werkstuk staan (zie figuur 13.21). Dit vereist het roteren van de spil-as of het werkstuk om twee assen, dus een besturing van 5 assen. De rotatieassen om de X- en Y-as worden respectievelijk de **A-as** en **B-as** genoemd.



Figuur 13.20 Bewerken 3D-contour met bolkopfrees



Figuur 13.21 Bewerken 3D-contour met kopfrees. 5-assige besturing



Figuur 13.22 NC-freesmachine met numeriek bestuurde draaitafel (AgieCharmilles)



Figuur 13.23 Draaitafel met twee numeriek bestuurde assen (DMG MORI SEIKI)

Voor sommige productvormen moet de freesspil juist evenwijdig aan het bewerkte vlak staan, zoals in figuur 13.15.

Freesmachines kunnen ook zijn uitgerust met een draaitafel. Vaak maakt deze alleen een indexeerbeweging om werkstukken in dezelfde opspanning van verschillende kanten te kunnen bewerken. In andere gevallen maakt de draaitafel een positioneerbeweging of zelfs een met de gereedschapsbewegingen gecoördineerde beweging. Dit laatste vereist dus een gecoördineerde besturing van de drie translaties en de rotatie van de draaitafel (zie figuur 13.22).
In figuur 13.23 zie je de gereedschapsspil en de draaitafel van een hogesnelheidsfreesmachine. De tafel is met twee numeriek bestuurde rotatieassen uitgerust, waardoor er sprake is van een 5-assige besturing.

13.5.2 Positiemeetsystemen

Aan het begin van paragraaf 13.5 vermeldden we al dat de besturing voortdurend de gevraagde en werkelijke positie vergelijkt en de bewegingen stuurt uitgaande van het **verschilsignaal**. Dit betekent dat er een positiemeetsysteem nodig is. In het verleden heeft men een grote verscheidenheid aan meetsystemen ontwikkeld. Ze zijn te onderscheiden naar de meetplaats, de meetmethode en de referentie van het meten.

Meetplaats; direct of indirect meten

De nauwkeurigste meetmethode is het rechtstreeks, **direct meten** van de positie van de slede ten opzichte van het machineframe. Dit vereist een lineair meetsysteem. Deze systemen zijn betrekkelijk duur en kwetsbaar. Men moet zorgen voor afdoende bescherming tegen spanen en snijvloeistoffen.

Bij een zeer groot deel van alle gereedschapswerktuigen worden de sleden verplaatst door middel van schroefspillen. De stand van de spil is dus een maat voor de positie van de slede. Het meten van de stand van de spil is **indirect meten**. Dit maakt het mogelijk een goedkoper en minder kwetsbaar roterend meetsysteem toe te passen. Daar staat tegenover dat spoedfouten en thermische vervormingen van de spil en spelingen tussen spil en slede tot meetfouten leiden. Het is mogelijk spoedfouten op te meten en deze via de besturing te compenseren.

Meetmethode; analoog of digitaal meten

Het meetsignaal verandert continu of stapsgewijs terwijl de positie van de slede verandert.

Referentie; absoluut of incrementeel meten

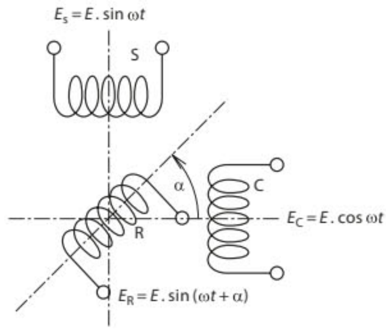
Bij **absolute meting** wordt het meetsignaal bepaald ten opzichte van een vast nulpunt van de machine. Bij incrementele systemen bestaat het signaal uit telpulsen, waaruit de besturing de positie berekent. Incrementele systemen werken dus digitaal.

Op basis van de indeling naar meetplaats, meetmethode en referentie zijn acht verschillende meetsystemen mogelijk. Deze varianten kunnen bovendien volgens verschillende fysische meetprincipes worden uitgevoerd. In de praktijk zijn er daarvan twee overgebleven: inductief, analoog, absoluut en optisch, digitaal, incrementeel. Deze behandelen we hier kort.

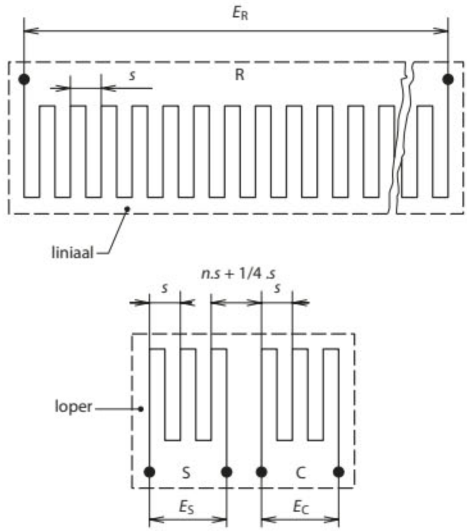
Inductief, analoog, absoluut

Figuur 13.24 toont het principe van een **resolver**. Twee statorwikkelingen, S en C, zijn 90° ten opzichte van elkaar verdraaid. De hoekstand van de rotorwikkeling R wordt bepaald door de rotatie van de leischroef, die een maat is voor de te meten verplaatsing. Een hoogfrequente wisselspanning (met een frequentie van circa 10 kHz) op de statorwikkelingen, de voedingsspanning, induceert wisselspanningen in de rotor die zowel in de piekspanning als in fase afhangt van de hoek α. Deze spanning fungeert als meetsignaal. Ook het omgekeerde (voedingsspanning op de rotorwikkeling en het meetsignaal op de statorwikkelingen) komt voor.

Dit is een **cyclisch-absoluut meetsysteem**, dat wil zeggen een systeem dat een absoluut meetsignaal geeft binnen één omwenteling. Het bereikbaar



Figuur 13.24 Principe van de resolver



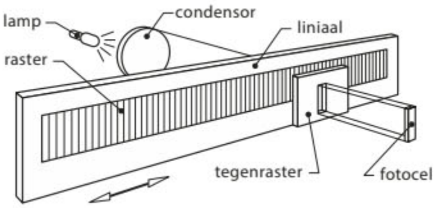
Figuur 13.25 Principe van de inductosyn

scheidend vermogen is 2000 stappen per omwenteling. Met een rechtstreeks gekoppelde resolver en een spoed van de leischroef van 5 mm is de kleinst programmeerbare stapgrootte dus 2,5 μm.

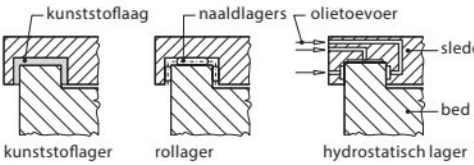
De **inductosyn** is een lineaire versie van de resolver (zie figuur 13.25). De liniaal is vergelijkbaar met de rotorwikkeling, de loper met de statorwikkelingen. De verschuiving van $n \times s + s/4$ van de statorwikkelingen komt overeen met de 90° rotatie bij de resolver. Een verschuiving van s komt overeen met één omwenteling. Bij een steek s van 2 mm is het bereikbaar scheidend vermogen 1 μm.

Optisch, digitaal, incrementeel

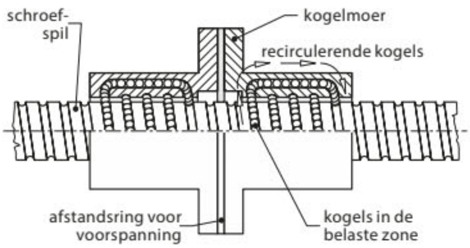
In figuur 13.26 zie je een sterk vereenvoudigde principeschets van een optisch digitaal meetsysteem. Bij



Figuur 13.26 Optisch digitaal meetsysteem



Figuur 13.27 Lagersystemen voor rechtgeleidingen



Figuur 13.28 Schroefspil met kogelomloopmoer

het verplaatsen van de liniaal laten de twee achter elkaar geplaatste rasters een hoeveelheid licht door die varieert tussen nul en een maximumwaarde en die door de fotocellen wordt gemeten. De rastersteek ligt tussen 10 en 40 µm. Het analoge signaal van de fotocellen wordt omgezet in pulsen, dus in digitale signalen. Op deze wijze is een scheidend vermogen tot 0,1 µm te bereiken. Evenals bij de inductieve systemen bestaan er zowel lineaire als roterende optische positie-opnemers.
Bij moderne machines komt het optisch digitaal systeem verreweg het meeste voor.

Scheidend vermogen en meetonzekerheid

Het scheidend vermogen is de kleinste verplaatsing die het systeem kan detecteren. De meetonzekerheid is meestal aanzienlijk groter dan het scheidend vermogen. Bij een resolutie van 0,1 µm kan de meetonzekerheid bijvoorbeeld ± 5 µm bedragen. Het is zaak de documentatie van machineleveranciers in dit opzicht zorgvuldig te bestuderen. In paragraaf 12.6.4 hebben we dit aspect uitvoeriger besproken.

13.5.3 Constructieve aspecten

Numerieke besturing stelt bijzondere eisen aan de constructie van de machine. Drie van deze eisen bespreken we in deze paragraaf.

Grote slijtagebestendigheid

Grote slijtagebestendigheid van bewegende elementen is nodig wegens het intensieve gebruik, veroorzaakt door meerploegendienst, door de sterke verkorting van de neventijden en door de grotere optredende krachten. Dit laatste komt doordat er vaker met optimale spaanopbrengst wordt verspaand, dat wil zeggen met maximale snededoorsnede.

Ontbreken van stick-slip

Bij de gebruikelijke glijlagers is de wrijvingscoëfficiënt bij glijden lager dan die bij stilstand. Bij een toenemende kracht komt de slede schoksgewijs op gang, de kracht daalt, de slede stopt weer enzovoort. De snaren van strijkinstrumenten komen door dit verschijnsel (**stick-slip**) in trilling. Bij NC-machines kan stick-slip de besturing volledig verstoren. Om dit te voorkomen worden glijlagers met een bekleding van kunststof, rollagers of, bij zeer hoge eisen ten aanzien van trillingvrijheid, **hydrostatische lagers** toegepast (zie figuur 13.27).

Afwezigheid van spelingen

Bij de handbediende machine compenseert de machinebediener de speling tussen moer en schroefspil door steeds in één richting te positioneren. Bij NC-machines is dit niet mogelijk, zeker niet bij het beschrijven van contouren. De meest toegepaste oplossing hiervoor is de schroefspil met **kogelomloopmoer**, afgebeeld in figuur 13.28. Door de moerhelften naar elkaar toe te trekken wordt de nog resterende speling opgeheven. De lagering met kogels voorkomt dat de wrijving hierdoor te sterk toeneemt.

13.6 Integratie in fabricagesystemen

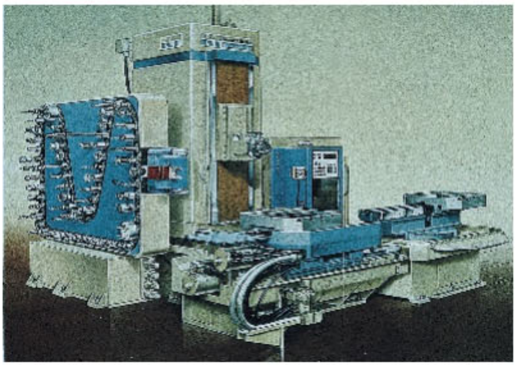
In de voorgaande paragrafen hebben we de werkingsprincipes van NC-machines uiteengezet. Machines gebouwd volgens deze principes vormen

de basis voor geïntegreerde fabricagesystemen. De ontwikkeling hiervan verloopt langs drie verschillende lijnen, die we in de volgende paragrafen zullen bespreken:
- het combineren van verschillende bewerkingen op één machine en, zo veel mogelijk, in één opspanning;
- het verhogen van de autonome werking van de machine;
- het combineren van een aantal machines tot een groep.

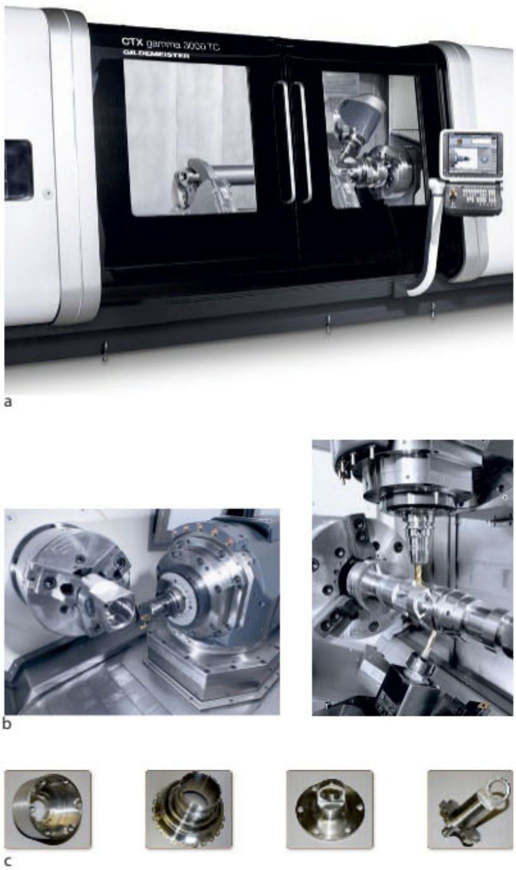
13.6.1 Het combineren van bewerkingen

Een van de sterke punten van NC-machines is de mogelijkheid om gecompliceerde bewerkingen uit te voeren. Deze eigenschap kan ook worden gebruikt om bewerkingen die gewoonlijk met verschillende machines worden uitgevoerd, door één machine te laten verrichten.
Een machine die verschillende bewerkingen met roterende hoofdbeweging van het gereedschap kan uitvoeren, zoals frezen, boren en kotteren, en is voorzien van een automatische gereedschapswisselaar wordt een **bewerkingscentrum** genoemd (zie figuur 13.29). Bewerkingscentra met een horizontale spil zijn vaak voorzien van een draaitafel, waardoor de machine het product van verschillende kanten kan bewerken zonder het opnieuw op te spannen. Sommige machines zijn zelfs uitgerust met een van horizontaal naar verticaal zwenkbare spil, zodat van een blokvormig werkstuk vijf van de zes vlakken in één opspanning kunnen worden bewerkt.

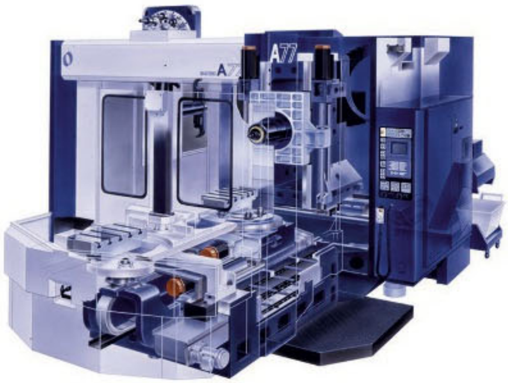
Van meer recente datum is de volgende opvallende trend bij de draaimachine. Steeds meer NC-draaimachines hebben de mogelijkheid om aangedreven gereedschappen op te nemen die bijvoorbeeld boor- en freesbewerkingen kunnen uitvoeren. Een dergelijke machine staat bekend als een **draaicentrum** (zie figuur 13.30). Veel draaiproducten die vroeger na het draaien op andere machines moesten worden nabewerkt, kunnen nu in één bewerkingsgang geheel worden afgemaakt. Dit betekent wel dat de besturing een stuk ingewikkelder wordt: op zijn minst is het nodig de hoekverdraaiing van de hoofdspil om de rotatieas, de **C-as**, te besturen. Dit kan een positioneerbeweging zijn of een continu gestuurde beweging tijdens het bewerken. Dit laatste is bijvoorbeeld nodig voor het frezen van een spiraalvormige groef. Afhankelijk van de gewenste bewerkingsmogelijkheden kunnen nog meer bestuurde assen nodig zijn.



Figuur 13.29 Bewerkingscentrum met kettingmagazijn en palletwisselaar



Figuur 13.30 Draaicentrum (DMG) (a), voorbeelden van bewerking op een dergelijk centrum (DMG) (b) en een aantal productvoorbeelden (LynnWelding) (c)



Figuur 13.31 Een bewerkingscentrum (Makino)

Mogelijk zal de bewerking op zichzelf minder efficiënt zijn. Een frees in de revolverkop van een draaimachine is nu eenmaal minder stijf opgespannen en heeft een lager aandrijfvermogen dan die in een freesmachine. Het combineren van bewerkingen biedt echter twee belangrijke voordelen:
- hogere nauwkeurigheid. Bij het opnieuw opspannen van een product treedt onvermijdelijk verlies aan nauwkeurigheid op. Het is dus gewenst het aantal opspanningen zo veel mogelijk te beperken;
- kortere **doorlooptijd**. Bij de overgang van de ene machine naar de andere treedt altijd een wachttijd op. Deze wachttijd is in de praktijk vaak een veelvoud van de bewerkingstijd. Vaak rekent men per bewerkingsgang met een vaste periode, bijvoorbeeld een dag of enkele dagen, ook als de feitelijke bewerking per product slechts één minuut kost! Het combineren van enkele bewerkingen tot één levert dus een belangrijke verkorting van de doorlooptijd op.

Figuur 13.31 toont een voorbeeld van een modern bewerkingscentrum. Het betreft een machine met hoge spilsnelheden en tafelsnelheden met hoge stijfheid en thermische stabiliteit. De besturing is in staat het gereedschap met hoge snelheid en grote nauwkeurigheid langs de gewenste baan te sturen.

13.6.2 Het verhogen van de autonome werking

Machines worden voorzien van **randapparatuur** die de autonome werking verder verhoogt. Deze randapparatuur kan bijvoorbeeld gereedschappen en producten wisselen of het bewerkingsproces bewaken. Dit laatste maakt het mogelijk de machine gedurende langere tijd zonder toezicht (autonoom) te laten werken. Een dergelijk systeem, voorzien van een voorraad werkstukken en gereedschappen, wordt een **flexibele fabricagecel** genoemd.
In deze paragraaf bespreken we de drie belangrijkste te automatiseren functies: het wisselen van gereedschappen, dat van werkstukken en het bewaken van het bewerkingsproces.

Wisselen van gereedschappen

Draaimachines

Bij draaimachines is het aantal benodigde gereedschappen beperkt. De ervaring leert dat voor circa 80% van alle werkstukken 8 of minder gereedschappen nodig zijn. In deze gevallen is de revolverkop het meest geschikte hulpmiddel (zie figuur 5.48b), vooral wegens de korte wisseltijd van maximaal enkele seconden. Dergelijke revolverkoppen hebben maximaal 12 posities. Zijn er toch regelmatig meer gereedschappen nodig, dan kunnen er twee revolverkoppen worden toegepast. De machine kan daarmee tegelijkertijd twee bewerkingen uitvoeren, waardoor de cyclustijd verder kan dalen. Hiervoor is het wel nodig dat de bewegingen van de revolversleden afzonderlijk gestuurd kunnen worden, wat twee extra bestuurde assen betekent.

Een andere mogelijkheid is het wisselen van gereedschappen met behulp van een industriële robot (zie paragraaf 13.9). Dit is een kostbare oplossing, dus alleen interessant wanneer de robot een aantal machines kan bedienen vanuit een gezamenlijk gereedschapmagazijn, of wanneer de robot ook de werkstukken verwisselt.

Bewerkingscentra

Bij een bewerkingscentrum is meestal een betrekkelijk groot aantal gereedschappen nodig. Deze moeten beurtelings in de spil worden geplaatst. De gereedschappen zijn opgenomen in een **gereedschapmagazijn** in de vorm van één of twee **trommelmagazijnen** met maximaal circa 40 posities elk (zie figuur 13.32), of in de vorm van een **kettingmagazijn** (zie figuur 13.29). Een kettingmagazijn heeft in principe een onbegrensd aantal posities, maar in de praktijk maximaal circa 120. Een **kastmagazijn** biedt ruimte voor meer dan 120 gereedschappen.

Een mechanisme wisselt de gereedschappen (zie figuur 13.33). Bij de meeste machines moet de spil

zich hiervoor naar een vaste wisselpositie bewegen. Een belangrijk kenmerk is de wisseltijd, vaak aangeduid als spaan-tot-spaantijd. De **gereedschapswisselaar** zet het gebruikte gereedschap op de plaats van het nieuwe in het magazijn. Dit betekent dat de besturing van de machine de plaats van het gereedschap moet bijhouden, of dat een codering de identiteit van de gereedschappen moet vastleggen.

Ook bij bewerkingscentra kunnen industriële robots worden ingezet. Op deze wijze is er geen beperking van het aantal gereedschappen. Deze oplossing is vooral van belang voor flexibele fabricagesystemen (zie paragraaf 13.6.3).

De verscheidenheid aan benodigde gereedschappen kan flink worden ingeperkt wanneer bij het ontwerpen een strakke standaardisatie wordt toegepast, bijvoorbeeld bij de keuze van gatdiameters, afrondingsstralen en verbindingselementen. Dit leidt tot:
- verlaging van de gereedschapsvoorraden;
- kleinere gereedschapmagazijnen;
- minder tijdverlies door gereedschapswisselingen;
- kortere omsteltijden.

Het beperken van gereedschapswisselingen is eveneens te realiseren door circulair frezen toe te passen (zie paragraaf 5.9.3). Doordat het freesgereedschap naast een rotatie ook nog een circulaire beweging uitvoert, zijn veel verschillende vormen te realiseren met eenzelfde gereedschap.
Hieruit blijkt opnieuw de overheersende invloed van het ontwerp op de kostprijs van producten en de noodzaak van een goede samenwerking tussen ontwerpers en productievoorbereiders.

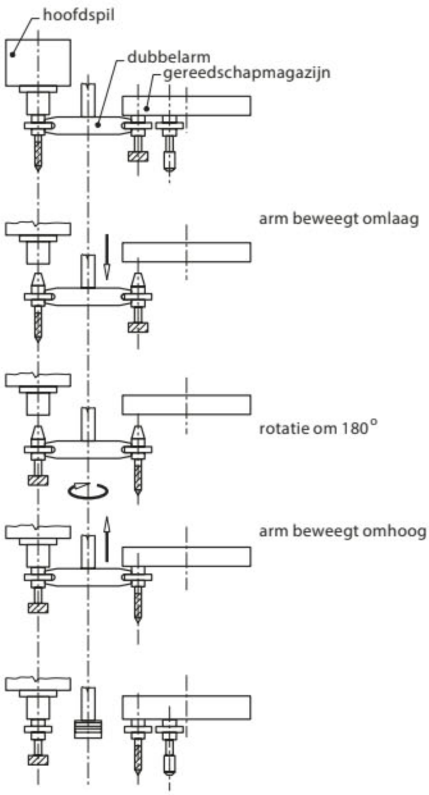
Wisselen van producten

Draaimachines

Zoals we hebben besproken in paragraaf 13.2.2, maakt het een groot verschil of de werkstukken uit een lange, door de holle hoofdspil aangevoerde staaf worden vervaardigd of uit aparte stukken uitgangsmateriaal, bijvoorbeeld afgezaagde stukken stafmateriaal of gietstukken. In het eerste geval wordt de staaf na het afsteken van het voorgaande werkstuk over de gewenste lengte doorgeschoven en daarna weer vastgeklemd. Voor grote aantallen is het mogelijk de staven automatisch vanuit een magazijn aan te voeren.
Losse werkstukken worden meestal in een klauwplaat gespannen. Bij deze spanmethode is het



Figuur 13.32 Trommelmagazijn voor gereedschappen op een bewerkingscentrum (Deckel Maho)



Figuur 13.33 Gereedschapswisselaar



a b

Figuur 13.34 Bewerkingscentrum met twee stations voor pendelend bewerken (a) en detailfoto van het ene station (b) (Unisign)

automatisch wisselen van producten veel moeilijker te realiseren. Bovendien is het vaak nodig het product om te keren na de eerste opspanning. Er zijn draaimachines leverbaar met een grijparm die deze handelingen kan verrichten.

Een tweede mogelijkheid is het inzetten van een afzonderlijk hanteerapparaat met zijn eigen besturing. Dit kan een algemeen inzetbare industriële robot zijn. Op zichzelf zijn deze duurder dan eenvoudige grijpers, maar eenvoudige grijpers hebben een afzonderlijk aan- en afvoersysteem nodig, omdat ze de producten steeds op dezelfde plaats opnemen en wegzetten. Een robot kan werkstukken uit een rek nemen en de gerede producten ergens wegzetten. Natuurlijk is het noodzakelijk dat de besturingen van de draaimachine en de robot met elkaar kunnen communiceren.

Bewerkingscentra

Werkstukken die op een bewerkingscentrum worden bewerkt, zijn zo divers dat het spannen nauwelijks te automatiseren is. Vooralsnog blijft dit grotendeels handwerk. Bovendien kan dit spannen een tijdrovende operatie zijn. De spantijd kan buiten de kostbare machinetijd worden gehouden door de producten te spannen op afzonderlijke spantafels, **pallets**. Tijdens het bewerken wordt de pallet met het eerstvolgende product bij de machine klaargezet. Een mechanisme, bijvoorbeeld in de vorm van een zwenkarm, zorgt vervolgens voor het snel verwisselen van de pallets (zie figuren 13.29 en 13.31).

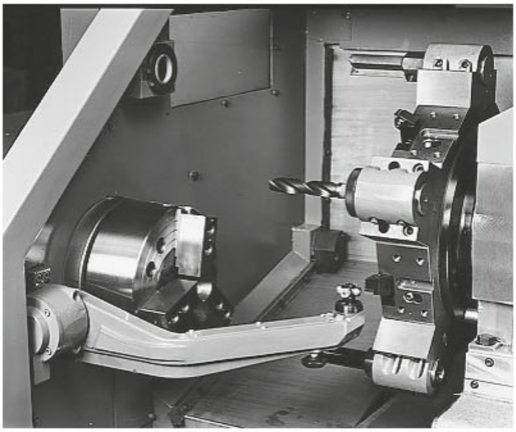
Een andere oplossing is het toepassen van een lange spantafel. Terwijl aan de ene kant een product wordt bewerkt, kan de bedieningsman aan de andere kant een gereed product afspannen en een volgend product opspannen. Dit heet **pendelend bewerken** (zie figuur 13.34).

Procesbewaking

Met de hulpmiddelen die we hebben besproken, kan een machine in principe een aantal producten achter elkaar bewerken zonder menselijke tussenkomst. De **procesbewaking** moet dan echter nog wel steeds door een mens worden uitgevoerd. De belangrijkste aspecten hiervan zijn het uitvoeren van maatcontroles om de nauwkeurigheid te beheersen en het ingrijpen bij het optreden van slijtage of breuk van gereedschappen. Soms moet de bedieningsman ook het uitgangsmateriaal controleren op afwijkingen. Moderne apparatuur kan deze functies geheel of gedeeltelijk overnemen.

Maatcontrole

Door de machine uit te rusten met een **meettaster** kunnen de belangrijkste foutenbronnen worden opgespoord. Met de taster kan het gereedschap of het product worden gemeten. In het eerste geval wordt gereedschapsslijtage of -breuk geconstateerd (boorpunt verdwenen); in het tweede geval worden rechtstreeks één of meer kritische maten van het product gecontroleerd (zie figuren 13.35 en 13.36).



Figuur 13.35 Meettaster voor meten van een gereedschap



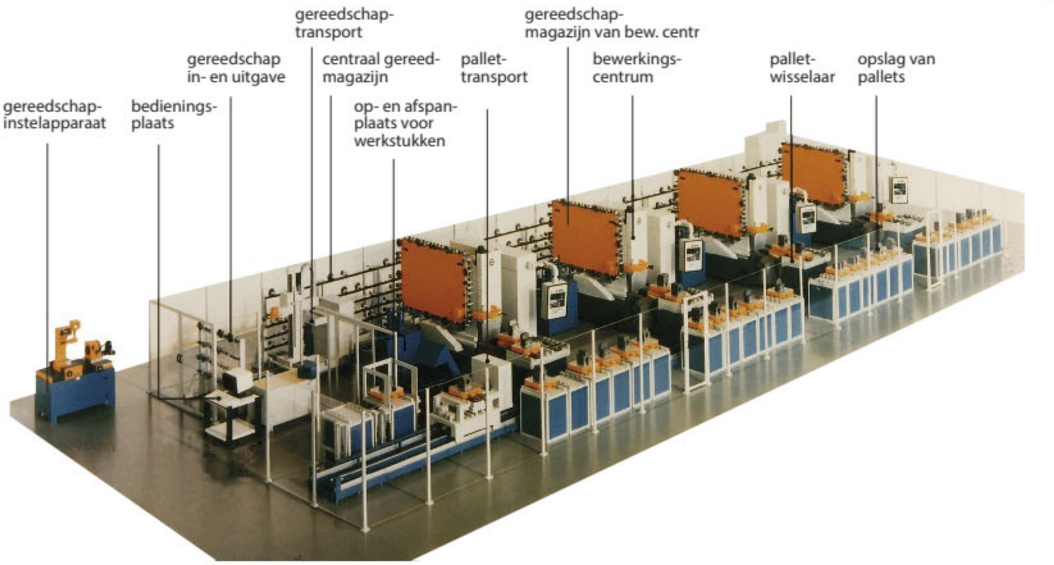
Figuur 13.36 Meettaster voor meten van een product (Renishaw)

Meettasters kunnen als een gereedschap worden gewisseld met behulp van de gereedschapswisselaar. Door signaaloverdracht met behulp van infrarood licht worden problemen met signaalkabels omzeild. Geconstateerde afwijkingen kunnen leiden tot het uitvoeren van een maatcorrectie, het uitwisselen van versleten of gebroken gereedschap of tot het onderbreken van het proces.

Bewaking van gereedschappen

De levensduur van gereedschappen als functie van het werkstukmateriaal en de verspaningscondities is bij benadering bekend. Ook de snijtijd van elk gereedschap per product is bekend. De besturing kan er dus voor zorgen dat gereedschappen die de verwachte levensduur bereikt hebben, tijdig worden verwisseld. Dit stelt wel hoge eisen aan de betrouwbaarheid van het proces. Er moet dus een redelijke veiligheidsmarge worden aangehouden om storingen te voorkomen.

Een andere mogelijkheid is het in de machine opnemen van **sensoren** die één of meer kenmerkende grootheden van het verspaningsproces kun-



Figuur 13.37 Flexibel fabricagesysteem (Werner)

nen meten. De snijkracht kan bijvoorbeeld worden gemeten met behulp van de stroomsterkte die de aandrijving opneemt of met krachtopnemers in de hoofdspillagers of in de gereedschapshouder. Trillingsopnemers kunnen ongewenste trillingen signaleren. Afwijkingen van het normale gedrag kunnen leiden tot het verwisselen van gereedschap, het onderbreken van het proces of tot het aanpassen van de verspaningscondities. Bij een bewaakt proces kan men kleinere veiligheidsmarges kiezen.

13.6.3 Het combineren van machines tot een groep

Een derde stap bij de opbouw van flexibele fabricagesystemen is het combineren van een aantal soortgelijke of juist verschillende, elkaar aanvullende, machines in een groep. Deze groep machines is voorzien van een gezamenlijke voorraad te bewerken producten, een voorraad gereedschappen, transportsystemen voor gereedschappen en producten, en vaak ook nog van een wasinstallatie voor het verwijderen van spanen en een meetmachine. Het geheel wordt gestuurd door een hiërarchisch systeem van computers, die elk een deel van de besturingsfuncties vervullen. Een dergelijke productie-eenheid wordt een **flexibel fabricagesysteem** (**flexible manufacturing system, FMS**) genoemd (zie figuur 13.37).

Het doel van een FMS is om een familie van gelijksoortige producten in willekeurige volgorde, dus in principe in series van één exemplaar, vergaand geautomatiseerd te bewerken. Het vormen van families van gelijksoortige producten staat bekend als groepentechnologie (zie hoofdstuk 15). De zeer hoge investeringen voor een dergelijk systeem zijn alleen verantwoord wanneer de capaciteit ervan (bijna) volledig, dat wil zeggen 24 uur per dag, wordt benut en wanneer de werkvoorbereidingstaak niet te omvangrijk wordt. Bovendien moet de betrouwbaarheid van alle uitgevoerde handelingen zeer hoog zijn. Deze eisen beperken in de praktijk de toepassing van deze systemen.

Een deel van de benodigde investering is te compenseren door één enkel onderdeel te produceren kort voordat het nodig is in de montage. Dit levert een aanzienlijke vermindering op in het kapitaalbeslag als gevolg van tussenvoorraden.

13.7 Programmeren

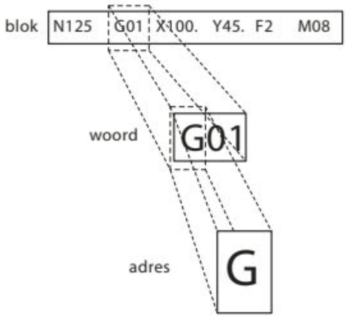
13.7.1 Inleiding

In hoofdstuk 14 behandelen we de werkvoorbereiding voor de onderdelenfabricage. Uitgaande van de tekening bepaalt de werkvoorbereider de methode voor het bewerken van het product. Afhankelijk van de situatie in het bedrijf wordt hierbij een groter of kleiner deel van de beslissingen overgelaten aan de machinebediener. Bij het toepassen van numerieke besturing moet de besturing van de machine tot in het kleinste detail worden gevoed met de gegevens over de uit te voeren werkzaamheden. Het programmeren van NC-machines maakt dus deel uit van de meest volledige vorm van werkvoorbereiding.

De volgende stappen zijn van belang bij het programmeren:
- de keuze van de bewerkingsmethode, de te gebruiken machine(s), de bewerkingsvolgorde en de opspanningen;
- de wijze van opspannen;
- de keuze van de snijgereedschappen;
- de keuze van de verspaningscondities, zoals snededoorsnede en snijsnelheid;
- het zodanig vertalen van de werkstukgeometrie dat de besturing de juiste gereedschapsbaan kan realiseren.

De eerste twee punten, en meestal ook het derde punt, maken altijd deel uit van de werkvoorbereiding. De laatste twee punten worden, vooral bij kleine series, vaak overgelaten aan de degene die de machine bedient.

Het programmeren van NC-machines kan op een aantal manieren gebeuren:
- Bij **handprogrammeren** stelt de programmeur het werkstukprogramma zelf 'met de hand' op.
- Bij **computerondersteund programmeren** voert de programmeur de gegevens van de begin- en eindvorm van het product en van de gereedschappen en de verspaningscondities in op een computer die losstaat van de machine. Computerprogramma's verwerken deze gegevens tot de programmacode die dient als invoer voor de machinebesturing. Deze methode bestaat in een aantal varianten die principieel van elkaar verschillen.
- De opkomst van de CNC-besturingen heeft het mogelijk gemaakt aan de machine te



Figuur 13.38 Blok (regel) uit een NC-programma

programmeren. Dit **machineprogrammeren** wordt veelal uitgevoerd door de bediener van de machine. In wezen geldt hierbij precies hetzelfde als bij computerondersteund programmeren, met dit verschil dat de machinebesturing tevens wordt gebruikt als programmeercomputer.

13.7.2 Handprogrammeren

Het handprogrammeren was in de beginfase van de ontwikkeling van numerieke besturing de enig beschikbare methode. Elke handeling van de machine wordt hierbij gestuurd met behulp van een programmaregel, gewoonlijk een **blok** genoemd. In de loop van de tijd zijn verschillende blokformaten gebruikt; tegenwoordig is het 'woord-adres'-formaat volgens ISO 9683 min of meer standaard. Elk blok bestaat uit een aantal woorden. Elk woord bestaat uit een letter, het **adres**, en een getalcode. Het adres geeft aan waarop de daaropvolgende getalcode betrekking heeft. Enkele voorbeelden van adressen zijn:

N: bloknummer
G: wijze van verplaatsen
M: schakelinformatie
S: snijsnelheid of toerental
T: gereedschapnummer

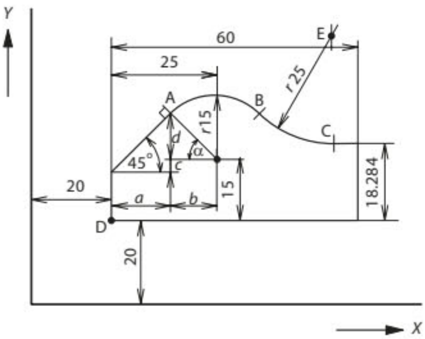
Woorden waarvan de inhoud niet wijzigt ten opzichte van die in het voorgaande blok, worden niet vermeld. De lengte van een blok is dus variabel. Figuur 13.38 geeft een voorbeeld van een blok volgens dit formaat, in figuur 13.39 zie je een eenvoudig programma.

Handprogrammeren brengt voor de programmeur veel rekenwerk met zich mee, zoals de berekening van:

- de compensatie voor de freesdiameter of de afrondingsstraal van de beitelpunt;
- de overgangspunten van een rechte naar een cirkelboog;

TUDelft, Lab PME				Programmablad					blad ... van ...	
Programma id:							datum:			
Werkstuknr.:							opmerking:			
Programmeur:										
N	G	H	X	Y	Z / I	J	F	S	T	M
%										
N0001	G00		X10.	Y10.					T01	M06
N0005	G44	H11			Z0.			S200		M03
N0010	G92		X-10.	Y-10.	Z20.					
N0020					Z10.					
N0030	G41	H01								
N0040			X0.	Y-2.						
N0050	G01			Y11.213			F300.			M08
N0060			X14.393	Y25.213						
N0070	G02		X35.607		I10.607	JI10.607				
N0080	G03		X53.284	Y18.284	I17.677	J17.677				
N0090	G01		X60.							
N0100				Y0.						
N0110			X-2.							
N0120	G40									M09
N0130	G00		X-10.	Y-10.	Z20.					M05
N0140	G92				Z0.					
N0150	G43	H11		Y0.						M06
N0160										M02

Figuur 13.39 Voorbeeld van een NC-programma



$\alpha = 45°$
$X_D = 20$ mm
$d = r \cdot \sin\alpha$
$d = 15 \cdot \sin 45° = 10{,}607$
$Y_A = 20 + 15 + d = 45{,}607$
$\alpha = 45° \Rightarrow b = d$
$X_A = 20 + 25 - b = 45 - 10{,}607 = 34{,}393$ mm
$a = 25 - b = 14{,}393$
$45° \Rightarrow a = d + c$
$c = 14{,}393 - 10{,}607 = 3{,}786$
$Y_D = 20 + 15 - c = 31{,}214$ mm

Figuur 13.40 Geometrische problemen bij handprogrammeren

- de middelpunten van cirkelbogen;
- de X- en Y-coördinaten van gaten op een steekcirkel;
- de tussenpunten van een voordraaicyclus;
- de toerentallen bij een variërende draaidiameter.

Voor het frezen van de buitenomtrek van het product in figuur 13.40 moet de programmeur de coördinaten van de punten A tot en met E berekenen.

Wat berekend moet worden, hangt ook af van de mogelijkheden van de betreffende besturing.

Het programma wordt met behulp van een tekstverwerker ingevoerd en na controle overgezet op de informatiedrager. Het zal duidelijk zijn dat bij een programma van enige omvang de kans op fouten zeer groot is. Voorafgaand aan het proefdraaien wordt daarom de gereedschapsbaan vaak eerst gesimuleerd. Deze methode is zeer bewerkelijk en wordt dan ook alleen nog toegepast voor zeer eenvoudige programma's.

Enkele blokken van het getoonde programma worden hier toegelicht:

N 0001:
: G00: Ga in ijlgang, naar punt X10.(0), Y10., kies gereedschap T01, M06: Start gereedschapswissel.

N 0005:
: G44: Stel gereedschapslengtecompensatie in met de waarde op geheugenplaats H11, ga naar punt Z0., S200.: Toerental 200 omw/min, M03: Start spil rechtsom.

N 0050:
: G01: Ga met geprogrammeerde voedingssnelheid naar Y11.213, F300.: Voedingssnelheid 300 mm/min, M08: Zet koeling aan.

N 0080:
: G03: Ga via cirkelboog tegen de klok in naar X53.284, Y18.284 met middelpunt I17.677, J17.677.

13.7.3 Computerondersteund programmeren

In paragraaf 13.4 wezen we er al op dat handprogrammeren niet geschikt is voor producten met een complexe geometrie, waar NC-fabricage toch in de eerste plaats voor bedoeld was. In paragraaf 13.6.2 hebben we dat nog nader toegelicht. Al snel na de ontwikkeling van handprogrammeren werd duidelijk dat de computer uitkomst kon bieden en ook het toepassingsgebied aanmerkelijk kon uitbreiden. De programmeertaak bestaat hierbij uit de volgende onderdelen:

- definieer de gegeven geometrie, zodanig dat deze in de computer kan worden ingevoerd;
- bereken de gereedschapsbaan waarmee het gedefinieerde product ontstaat en houd hierbij rekening met de vorm van het gereedschap en de verspaningscondities;
- vertaal de gereedschapsbaan in een code die door de machinebesturing gelezen kan worden.

Er zijn verschillende programmeertalen ontwikkeld waarmee deze informatie op een doelmatige wijze kan worden ingevoerd en verwerkt. Deze programmeertalen zijn te verdelen in **geometrisch georiënteerde programmeertalen** en **technologisch georiënteerde programmeertalen**. Geometrisch georiënteerde programmeertalen zijn algemeen toepasbaar. De keuzen van de bewerkingen, gereedschappen en bewerkingscondities worden overgelaten aan de programmeur. Bij de technologisch georiënteerde programmeertalen neemt de programmatuur deze keuzen geheel of gedeeltelijk voor zijn rekening. Daar staat tegenover dat deze talen zich beperken tot bepaalde toepassingsgebieden, waaronder draaien, frezen en lasersnijden.

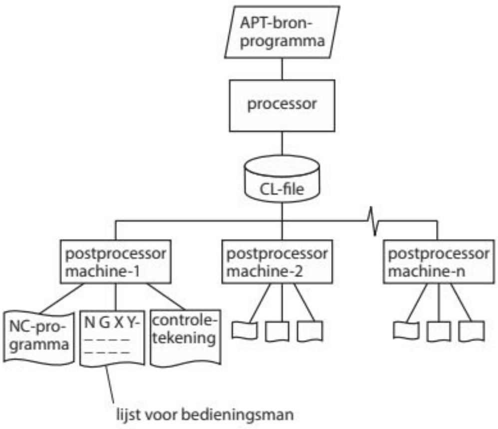
Geometrisch georiënteerde programmeertalen

De oudste geometrisch georiënteerde programmeertaal, **APT (Automatically Programmed Tools)**, werd oorspronkelijk ontwikkeld in de periode 1957-1961. De in deze taal gebruikte codes voor de geometriebeschrijving (het bronprogramma) van een product, worden vandaag de dag nog steeds vaak gebruikt als input voor numerieke besturingsprogramma's. De bronprogramma's voorzien in de numerieke beschrijving van de meest complexe geometrieën en leveren een algemene, machineonafhankelijke uitvoer voor de bewerking van een product: de CL-file (Cutter Location-file). De gegevens in deze CL-file dienen vervolgens als invoer voor een machinegebonden postprocessor. De uitvoer van de postprocessor dient op zijn beurt als invoer voor de feitelijke besturing van de betreffende bewerkingsmachine (zie figuur 13.41). Naast het 'vertalen' van de CL-data controleert de postprocessor of de machine niet buiten zijn werkbereik komt. Daarnaast berekent deze de machinetijd en maakt desgewenst een controletekening van de berekende gereedschapsbanen.

Werkwijze bij het programmeren.

Het **bronprogramma** zoals ingevoerd door de werkstukprogrammeur bestaat uit:
- de definitie van de geometrie;
- de bepaling van de gereedschapsbaan;
- de keuze van de gereedschappen, van de instelgrootheden en van de machine.

De **geometriedefinitie** van een product kan worden



Figuur 13.41 Structuur APT en afgeleide talen

vastgelegd met behulp van eenvoudige basiselementen zoals punten, lijnen, cirkels, cilinders en andere wiskundig bepaalde oppervlakken. Het is de taak van de werkstukprogrammeur om uit te zoeken uit welke basiselementen het werkstuk moet worden opgebouwd. Elk geometrisch element krijgt een willekeurige symbolische naam en wordt vervolgens met een **woord/APT-modificator** gedefinieerd. We lichten hier twee regels uit het voorbeeld in figuur 13.42 toe:

Regel 40:
STP (naam) = POINT (APT-woord)/
-10, -10,20 (modificator). Punt met -coördinaten
-10, -l0, 20.

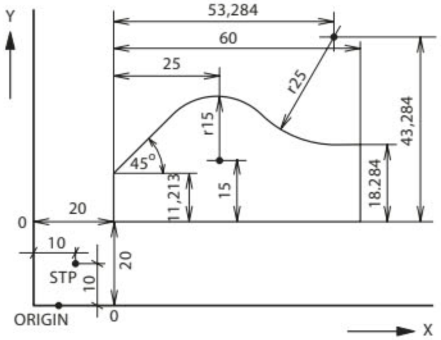
Regel 80:
L3 = LINE/(POINT/0, 11.213), LEFT, TANTO, C1:
Lijn door punt 0, 11.213 rakend aan (TANTO) cirkel met naam C1. Van de twee mogelijke raaklijnen wordt de linker (LEFT) bedoeld, kijkend in de richting van het punt naar de cirkel.

De besturingstaal kent vele tientallen manieren om punten, lijnen, cirkels en dergelijke te definiëren. De keuze van de definitie hangt mede af van de wijze waarop de maten op de tekening zijn ingeschreven.

De gedefinieerde geometrie bestaat uit onbegrensde lijnen en volledige cirkels. Er is dus meer informatie nodig om de **gereedschapsbaan** vast te kunnen leggen. De programmeur beschrijft daarom de gereedschapsbaan vanaf het startpunt (*set point*, STP) langs de geometrische elementen L1-L5 en C1-C2. Hij houdt hierbij rekening met de gewenste freesrichting (meeloopfrezen). De machinebesturing compenseert zelf de gereedschapsbaan voor de freesdiameter (regel 140: CUTCOM/LEFT).

De programmeur begint met de **opstartcommando's**, regel 130: RAPID; FROM/STP en regel 150: GO/TO, L2,0N,(PLANE/10),TO,L1. Ga in ijlgang vanaf STP tot aan L2 langs het vlak op 10 mm boven het XY-vlak tot aan L1. Daarna stuurt de programmeur de frees met de **bewegingscommando's** GOLFT, GORGT (linksaf, rechtsaf) en GOFWD, GOBACK (voorwaarts, achterwaarts) langs de geometrie-elementen (regels 180-240).
Ten slotte gaat de frees in ijlgang terug naar STP (regel 260).

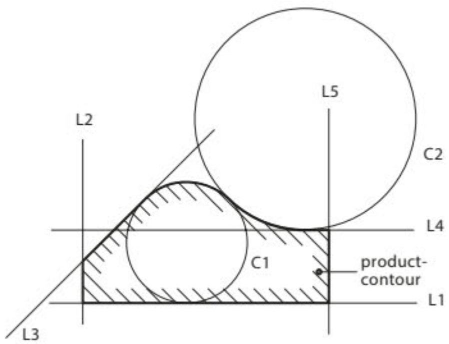
Regel 120 geeft de gereedschapskeuze (LOADTL/1,12,l), de snijsnelheid (RPM,200), de



a

```
 10 PARTNO  - FREESWERKSTUK MINIAPT -
 20           MACHIN/FREES1
 30           ORIGIN/ -20, -20, 0
 40 STP    =  POINT/ -10, -10, 20
 50 L1     =  LINE/XAXIS, 0
 60 L2     =  LINE/YAXIS, 0
 70 C1     =  CIRCLE/ 25, 15, 15
 80 L3     =  LINE/ (POINT/ 0, 11.213),
              LEFT, TANTO, C1
 90 L4     =  LINE/ XAXIS, 18.284
100 C2     =  CIRCLE/ YLARGE, L4, XLARGE, OU,
              C1, RADIUS, 25
110 L5     =  LINE/ YAXIS, 60
120           LOADTL/ 1, 11, 1, RPM, 200, CLW;
              CUTTER/ 10
130           RAPID;  FROM/ STP
140           CUTCOM/ LEFT
150           GO/TO, L2,ON,(PLANE,/ 10), TO,1
160           COOLNT/ ON
170           FEDRAT/ 300
180               GOLFT/ L2, FAST, L3
190               GORGT/ L3, C1
200               GOFWD/ C1, TANTO, C2
210               GOFWD/ C2, TANTO, L4
220               GOFWD/ L4, PAST, L5
230               GORGT/ L5, PAST, L1
240               GORGT/ L1, PAST, L2
250           CUTCOM/ OFF;  COOLNT/ OFF
260           RAPID;  GOTO/ STP
270           SPINDL/ OFF;  LOADTL/ 0
280           FINI
```

b



c

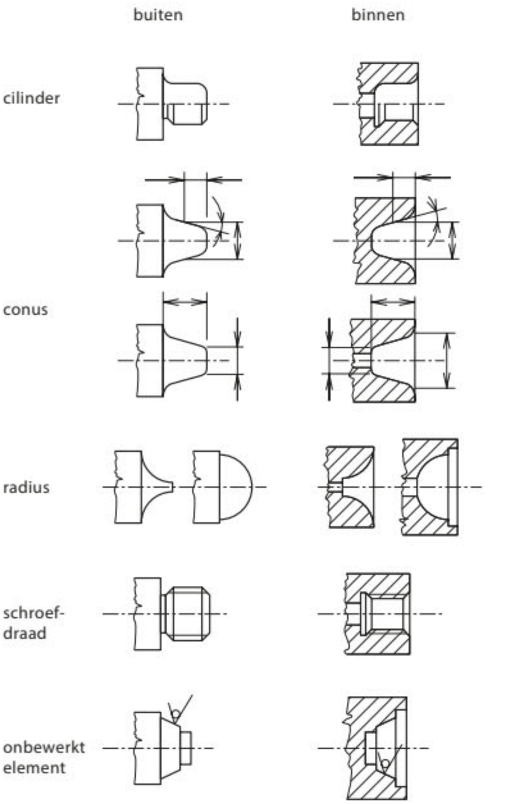
Figuur 13.42 Voorbeeld werkstuk (a) met bijbehorend APT-programma (b) en geometriedefinitie (c)

rotatierichting van de frees rechtsom (CLW) en de freesdiameter (CUTTER/10). Regel 170 geeft de voedingssnelheid in mm/min (FEDRAT/300), regels 160 en 250 schakelen de koeling aan en uit (COOLNT/ON,OFF).

Nadat het bronprogramma is ingevoerd, berekent de processor de CL-data. Deze wordt opgeslagen in de CL-file.
De machinegebonden postprocessor, opgeroepen in regel 20 (MACHIN/FREES1), maakt het stuurprogramma dat voor de desbetreffende machine geschikt is. Desgewenst kan hiervan een afdruk en een controletekening worden gemaakt voor de bedieningsvakman.

Technologisch georiënteerde programmeertalen

Bij technologisch georiënteerde programmeertalen wordt naast de eenduidige definitie van de werkstukgeometrie in sterke mate rekening gehouden met de technologie van de bewerkingen. Dit betreft vooral scheidende en verspanende bewerkingen. Bij enkele bewerkingstechnieken die we hebben besproken in hoofdstuk 8, zoals de materiaalaangroeitechnieken, is het gebruik van een technologisch georiënteerde programmeertaal gewenst. Soms zijn dit zelfs de enige talen waarmee een goed resultaat kan worden bereikt. Het doel van technologisch georiënteerde programmeertalen is om met een minimum aan invoer het besturingsprogramma en de bewerkingsinstructies zo veel mogelijk automatisch te genereren. De invoer beperkt zich voornamelijk tot gegevens over de geometrie van de uitgangsvorm, de gewenste eindvorm en het werkstukmateriaal. Het programmeersysteem neemt in dit geval alle technologische beslissingen over de keuze van de bewerkingsmethode, de gereedschappen en de procescondities die normaal door de werkvoorbereider worden genomen (zie hoofdstuk 14). Bij de computerondersteunde werkvoorbereiding (zie paragraaf 14.6) wordt de werkstukgeometrie opgedeeld in vooraf parametrisch gedefinieerde vormelementen, features genoemd, met toevoeging van toleranties. Bewerkingsmethoden en de bijbehorende technologische informatie zijn verbonden met deze, min of meer standaard gedefinieerde, vormelementen. Hieruit kunnen delen van het werkstukprogramma grotendeels of zelfs geheel automatisch afgeleid worden. In figuur 13.43 zie je enkele voorbeelden van features.



Figuur 13.43 Features bij draaiwerkstukken

Programmeren met behulp van een CAD/CAM-systeem

CAD/CAM staat voor **computer-aided design/computer-aided manufacturing**. Bij CAD definieert de ontwerper een product interactief op een grafisch beeldscherm. Dit betekent dat de geometrie van het product wordt vastgelegd in het geheugen van de computer. Het is dus niet meer nodig deze stap nog een keer te herhalen bij het maken van het werkstukprogramma.

Het bepalen van de opspanningen, het kiezen van de gereedschappen en het aangeven van de gereedschapsbaan verloopt op dezelfde, grafisch interactieve, wijze als bij het ontwerpen. De programmeur wijst de vormelementen van het product aan op het beeldscherm. Het inschrijven van maten op de tekening is dan ook (in principe) overbodig. De berekende gereedschapsbaan wordt meteen op het beeldscherm getoond. De keuze van het gereedschap en de verspaningscondities vindt plaats in dialoogvorm. Het eindresultaat is een CL-file zoals we hebben beschreven bij de geometrisch georiënteerde programmeertalen. Ten slotte moet dan weer een machinegebonden postprocessor worden opgeroepen. (Zie ook ISO-standaard 4343 2000.)

Als bij complexe producten veel verschillende bewerkingen en gereedschappen nodig zijn, is het belangrijk dat de werkvoorbereiding en de programmering geheel of grotendeels automatisch kunnen worden uitgevoerd. Hiervoor is programmatuur ontwikkeld die bekendstaat als **CAPP (computer-aided process planning**, zie ook hoofdstuk 14).

13.7.4 Machineprogrammeren

In de voorgaande paragrafen hebben we programmeermethoden besproken waarbij een programma wordt gemaakt dat daarna met behulp van een informatiedrager of een lijnverbinding aan de machinebesturing wordt overgedragen. Door de ontwikkeling van CNC-besturingen, uitgerust met beeldscherm en toetsenbord, werd het mogelijk programma's rechtstreeks met de hand in de besturing in te voeren. Dit heet machineprogrammeren.

Door de ontwikkeling van dialoogprogramma's en grafische beeldschermen die het gedefinieerde product en de gereedschapsbaan zichtbaar maken, is deze werkwijze in veel gevallen een aantrekkelijk alternatief. De hoeveelheid informatie die de programmeur, meestal tevens de bedieningsvakman, moet invoeren wordt sterk beperkt doordat de programmatuur in de besturing over krachtige vaste cycli beschikt, bijvoorbeeld ten behoeve van voordraaien, draadsnijden en gatenpatronen. Ook technologische gegevens zijn soms in de software ingebouwd. Daarnaast is het vaak mogelijk CAD-modellen in te voeren, zodat de geometrie niet meer hoeft te worden beschreven. De werkwijze is dan vergelijkbaar met die bij het programmeren met behulp van een CAD/CAM-systeem.

Een andere vorm van machineprogrammering is mogelijk bij machines met een **teach-in besturing**. Dit zijn machines die met de hand kunnen worden bediend. De handelingen die tijdens het maken van het eerste product zijn uitgevoerd, worden in het geheugen van de besturing opgeslagen en bij de volgende producten van de serie automatisch herhaald. Desgewenst kan het programma ook voor herhaalopdrachten worden bewaard. Men verkleint hiermee de stap van handbediende machines naar NC-machines.

Machineprogrammeren kent een aantal voor- en nadelen:

Voordelen:
- Er is geen programmeerafdeling nodig. Dit is vooral een voordeel voor kleine bedrijven met één of enkele machines. Het programma wordt gemaakt door de persoon met de meeste kennis van de betreffende machine.
- Een snelle reactietijd is mogelijk doordat programmeren, testen en bewerken elkaar onmiddellijk opvolgen. Dit kan bijvoorbeeld bij reparatiewerkplaatsen zeer belangrijk zijn. Bij het optreden van fouten in programma's kan de bedieningsman meteen ingrijpen. Gedurende de nachtdienst hoeft er dus niet eerst een programmeur van huis gehaald te worden.
- De bedieningsman krijgt een grotere taakinhoud. Dit kan leiden tot een hogere arbeidsmotivatie.

Nadelen:
- Gedurende het programmeren wordt er niet geproduceerd. De machine fungeert dan als een zeer dure programmeerplaats. **Parallelprogrammeren**, programmeren terwijl de machine produceert, is tegenwoordig echter soms ook mogelijk.
- Er worden hoge eisen gesteld aan kennis en vaardigheden van de bedieningsman.
- De programma's zullen vaak niet optimaal zijn. Ze zijn sterk persoonsgebonden. De werkplaats is ook niet de ideale omgeving om de benodigde concentratie voor het programmeren op te brengen.
- Elke besturing kent een andere wijze van programmeren. Naarmate een bedrijf meer NC-machines aanschaft, neemt de kans op verwarring toe.

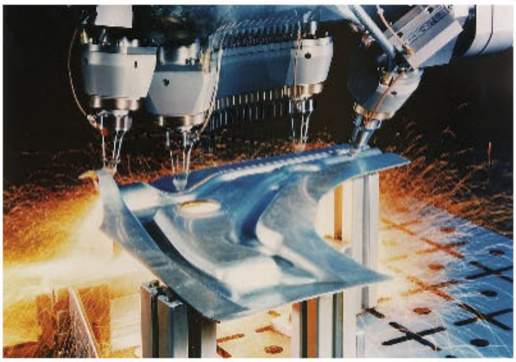
Daarnaast gelden er beperkingen voor de moeilijkheidsgraad van de producten. Bij het tekenen moet de maatinschrijving zo goed mogelijk worden afgestemd op de programmeermethode van de betreffende besturing.

13.8 NC bij niet-verspanende bewerkingen

De overgrote meerderheid van de NC-bewerkingsmachines bestaat uit verspaningsmachines. Bij veel niet-verspanende bewerkingen is de informatie over het product vastgelegd in de gereedschappen, zoals gietvormen, snij- en dieptrekstempels.
Bij een aantal processen kan het zinvol zijn om te werken met niet-productgebonden gereedschappen, bijvoorbeeld vanwege de vorm en afmetingen van de producten. Dit kan ook de kosten drukken van kleine totaal- en fabricageseries.

In deze paragraaf geven we een overzicht van verschillende NC-machines. We maken hierbij onderscheid tussen machines voor scheidende bewerkingen, machines voor omvormen, machines voor zinkvonken en machines voor verbinden. Tot slot kijken we naar flexibele automatisering van het aanvoeren van onderdelen naar de montageplek.

Machines voor scheidende bewerkingen:
- De revolverponsmachine (zie figuur 7.15). De meeste van deze machines kunnen zowel ponsen als knabbelen. Bij deze machines dient het gereedschap of het werkstuk naar de juiste positie te worden gebracht. Daarna wordt de scheidende bewerking uitgevoerd. Dit vraagt om een 2½D-besturing.
- Snijmachines, zoals brand-, waterstraal- en lasersnijmachines, waarbij de gewenste productgeometrie met een straal wordt uitgesneden (zie figuur 13.44). Een contour in één vlak kan al met 2D-besturing verwezenlijkt worden. Een ruimtelijke gereedschapsbaan is met een 3D-besturing mogelijk, maar complexere vormen zoals schuine of regelvlakken vereisen een 4D- of 5D-besturing.
- De draadvonkmachine (zie figuur 13.45). Door de draadgeleiders aan boven- en onderzijde van het werkstuk onafhankelijk van elkaar te besturen kunnen schuine vlakken en regelvlakken zoals



Figuur 13.44 NC-lasersnijmachine

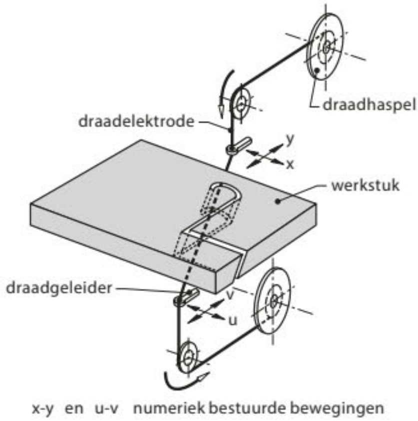
kegels worden gesneden. Dit vereist dus een 4D-besturing.

Machines voor omvormen:

- De NC-kantpers is een bekende toepassing voor het buigen van plaat (zie figuur 13.46). Het principe van de kantpers hebben we besproken in hoofdstuk 4. Bij het vrij buigen bepaalt de indrukdiepte van het stempel de buighoek. De ingestelde positie van de achteraanslag bepaalt de plaats van de buiglijn. Deze waarden moeten voor elke bocht opnieuw worden ingesteld. Bij het kanten van een serie producten zal daarom bij de handbediende machine van alle producten eerst bocht 1 worden gebogen, vervolgens van alle producten bocht 2 enzovoort. De bedieningsman moet dus alle producten meerdere keren opnemen en weer wegleggen. Met een NC-programma kunnen alle bochten van een product achter elkaar worden afgewerkt. Voor het hanteren van de plaat kan eventueel een robot worden ingezet.
- De NC-pijpenbuigmachine (zie figuur 13.47). Bij het buigen van pijpen, bijvoorbeeld leidingen voor hydraulische systemen, moeten voor elke bocht drie waarden worden ingesteld: de plaats van de bocht (translatie in de lengterichting van de pijp, Y-as), het vlak waarin de bocht ligt (rotatie om de hartlijn van de pijp, B-as) en de buighoek (rotatie van het buiggereedschap, C-as). Bij de handbediende machine gebeurt dit door het instellen van aanslagen. Door het optreden van terugvering is het instellen van de buighoek altijd een 'trial and error'-proces. Bij NC-pijpenbuigmachines wordt het programma na het maken van enkele proefbochten nog gecorrigeerd voor de terugvering van de betreffende partij uitgangsmateriaal.
- Machine voor peenforming (zie paragraaf 6.4.2). Om de juiste vorm te bereiken is het nodig de plaats en de intensiteit van het stralen nauwkeurig te sturen. Het ligt voor de hand ook hierbij NC toe te passen.

Machines voor zinkvonken:

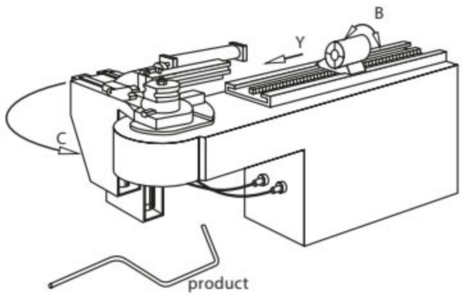
- Zinkvonken gebeurt in principe met een productgebonden gereedschap. Toch wordt de gewenste vorm vaak mede gerealiseerd door bewegingen van het gereedschap in een horizontaal vlak of door andere bewegingen, bijvoorbeeld rotatie (zie paragraaf 6.2.2). Deze bewegingen worden dan numeriek bestuurd.



Figuur 13.45 Principe van NC-draadvonkmachine



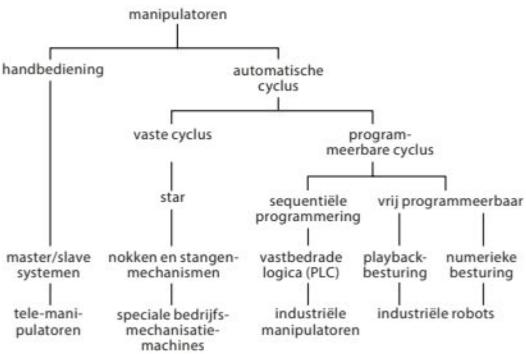
Figuur 13.46 NC-kantpers (Darley)



Figuur 13.47 NC-pijpenbuigmachine



Figuur 13.48 AGV (FMC Technologies)



Figuur 13.49 Schematische indeling manipulatoren

Machines voor verbinden:

- Lasverbindingen zijn zeer goed aan te brengen met robots. Door numerieke besturing in 5D zijn de meeste posities van de ruimte bereikbaar en kunnen robots langs verschillende ruimtelijk gekromde banen lasnaden leggen. In de auto-industrie worden lasrobots veelvoudig toegepast, bijvoorbeeld voor het positioneren, fixeren en puntlassen van de carrosserie.

Flexibele automatisering van het aanvoeren van onderdelen naar de montageplek is goed mogelijk, maar vaak zeer kostbaar.

- Voor het aanvoeren van onderdelen kunnen pallets met productdrager (zie paragraaf 11.3.3) met grote flexibiliteit ingezet worden. In een numeriek bestuurd transportsysteem is het mogelijk onderdelen door elkaar en naar verschillende locaties te vervoeren.
- Voor verplaatsing over grotere afstanden kunnen **AGV's** (**automated guided vehicles**) worden gebruikt (zie figuur 13.48). Deze voertuigen kunnen naar iedere gewenste locatie worden gestuurd.
- Een bijzonder flexibele manier van aanvoeren is het los plaatsen van verschillende onderdelen op een transportband. Om een onderdeel op te kunnen pakken dienen de vorm, de positie en de oriëntatie van het onderdeel met behulp van camera's (**vision system**) bepaald te worden. De numerieke informatie wordt vervolgens doorgegeven aan de robot die de montagehandeling uitvoert.

13.9 Industriële robots

13.9.1 Inleiding

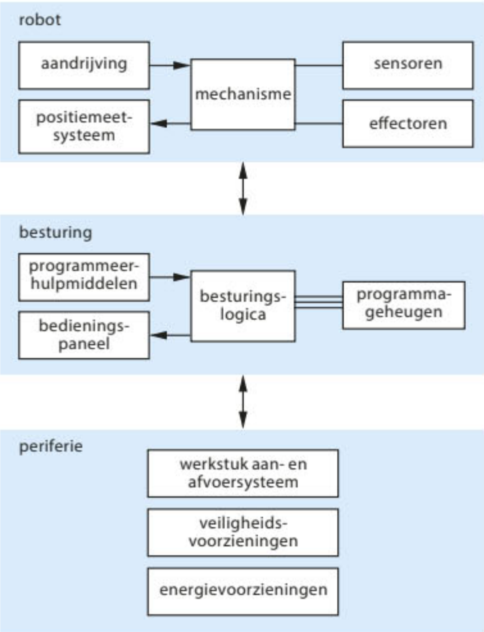
De **industriële robot** maakt deel uit van een grote familie van hanteerapparaten, ofwel **manipulatoren**. In het overzicht in figuur 13.49 zie je dat alleen vrij programmeerbare manipulatoren onder de industriële robots vallen. Bovendien beschouwt men universele bruikbaarheid als een kenmerk van industriële robots. Industriële robots zijn dus inzetbaar voor zeer uiteenlopende taken. De robot moet het gehanteerde voorwerp langs willekeurige banen naar elke gewenste positie binnen zijn werkbereik kunnen brengen. Hiervoor moet de robot in principe over zes vrijheidsgraden beschikken. In een aantal gevallen kunnen vijf vrijheidsgraden voldoende zijn, bijvoorbeeld bij het hanteren van roterend gereedschap of rotatiesymmetrische producten.

13.9.2 Robotsysteem

Een volledig **robotsysteem** bestaat uit drie subsystemen: de robot, de besturing en de periferie (zie figuur 13.50).

Robot

Zoals we al zeiden moet het mechanisme van de robot binnen een gegeven werkgebied het product



Figuur 13.50 Functioneel blokschema van een robotsysteem

of het gereedschap in elke gewenste positie en oriëntatie kunnen brengen. Van de benodigde vijf of zes vrijheidsgraden zijn er drie nodig om het **polsgewricht** op de juiste plaats te brengen. De bewegingen kunnen translaties (T) of rotaties (R) zijn. De gangbaarste mogelijke combinaties hebben we afgebeeld in figuur 13.51. De aanduiding geeft de volgorde van de translerende en roterende elementen aan, rekenend vanaf de vaste basis. Het meest voorkomende type, RRR, staat ook wel bekend als de **antropomorfe robot** (mensvormige robot) wegens de overeenkomst met de menselijke arm. De afkorting **SCARA** staat voor *Selectively Compliant Assembly Robot Arm*. Deze arm bestaat uit twee segmenten, elk met een verticale rotatieas. Hierdoor beweegt de arm in een horizontaal vlak. Deze configuratie is speciaal geschikt voor montagewerk, doordat de arm in het horizontale vlak een zekere **compliantie** (een relatief lage stijfheid) bezit. Hierdoor kan de betrekkelijk onnauwkeurige robot zelfcentrerende, nauwkeurig passende delen op hun plaats brengen. Het polsgewricht zorgt voor de oriëntatie van de **effector**. Dit is de verzamelnaam voor grijpers voor producten en bewerkingsgereedschappen, zoals een laspistool, verfspuit of slijptol. Dit gewricht heeft dus twee of drie rotatieassen.

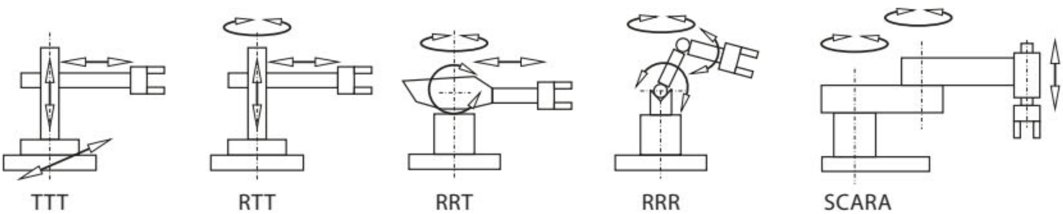
Sensoren zijn de 'zintuigen' van de robot. Ze maken het mogelijk dat de robot zijn bewegingen of verdere handelingen aanpast aan optredende variaties. Een bekend probleem in dit verband is het volgen van een lasnaad. Door verschillende oorzaken kunnen de plaats en de breedte van de lasnaad variaties vertonen. De robot moet zijn baan en de lasparameters, zoals voortloopsnelheid en stroomsterkte, daarop aanpassen.

De aandrijving en het positiemeetsysteem van robots zijn te vergelijken met die van NC-gereedschapswerktuigen. Verreweg de meeste robots hebben een elektrische aandrijving. Alleen zeer zwaar belaste uitvoeringen zijn voorzien van een hydraulische aandrijving.

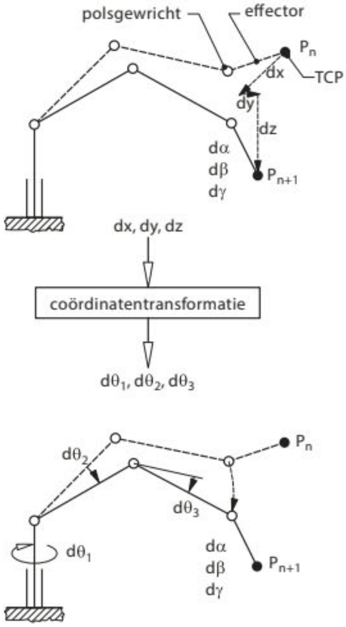
Besturing

De besturingen van industriële robots verschillen weinig van de gebruikelijke NC-besturingen. Het besturingssysteem van een robot moet echter met hoge snelheid gecompliceerde coördinatentransformaties berekenen (zie figuur 13.52). Het programma vraagt een verplaatsing (dx, dy, dz) van het uiteinde van de effector langs een gegeven baan, en eventueel ook nog een variërende oriëntatie. De besturing van een RRR-robot moet dit voortdurend omrekenen naar de benodigde hoekverdraaiingen ($d\theta_1$, $d\theta_2$, $d\theta_3$, $d\alpha$, $d\beta$, $d\gamma$) van zes scharnieren.

Een uitzondering hierop vormt de **playbackbesturing**. Bij dit type besturing wordt het bewegingspa-



Figuur 13.51 De meest voorkomende robotconfiguraties (T: translatie, R: rotatie, SCARA: Selectively Compliant Assembly Robot Arm)



Figuur 13.52 Principe van coördinatentransformatie (TCP = Tool Center Point)



Figuur 13.53 Lasinstallatie met 3 robots (Fanuc) voor booglassen

troon eenmalig opgenomen doordat de programmeur de bewegingen met de hand 'voordoet'. Bij het 'afspelen' van het programma herhaalt het bewegingspatroon zich. De playbackbesturing verhoudt zich tot de standaard numerieke besturing als een video-opname tot een computeranimatie.

Periferie

De **periferie** wordt gevormd door de inrichtingen voor het opspannen en positioneren van producten en/of voor het aan- en afvoeren daarvan. De robotbesturing moet zorgen voor de coördinatie van de activiteiten van de robot en de periferie. De lasinstallatie in figuur 13.53 bevat drie robotarmen, die samen het werkstuk en de lastoorts manipuleren. Andere installaties bestaan uit een robotarm en een afzonderlijke **lasmanipulator** met een of twee rotatie-assen die de opspanmal in de gunstigste stand draaien. Ook de beveiligingen die het personeel en de installatie moeten beschermen tegen onverwachte bewegingen van de robotarm behoren tot de periferie. De robot met zijn besturing is normaal gesproken een standaardproduct, met uitzondering van de effectoren. Deze laatste zijn sterk afhankelijk van de toepassing van de robot en worden meestal per geval ontwikkeld of aangepast. Meestal gebeurt dit in samenwerking met de robotleverancier. Hetzelfde geldt voor de periferie. De investeringen in effectoren en periferie overtreffen vaak ruimschoots de catalogusprijs van de kale robot. Een vuistregel zegt dat de prijs van een robotsysteem het drievoudige van de robot zelf (inclusief besturing) bedraagt.

13.9.3 Programmering

Er bestaan drie principieel verschillende manieren om robots te programmeren: playback programmeren, teach-in programmeren en offline programmeren.

Playback programmeren is uiteraard van toepassing voor playbackbesturingen. De programmeur, in dit geval meestal een specialist op het gebied van de betreffende bewerking, voert met de hand het vereiste bewegingspatroon uit. De bewegingen van de elementen van het robotmechanisme worden geregistreerd en naderhand 'afgespeeld'. De robot kan zo de soepele bewegingen van de menselijke hand maken. Programmeerkennis is hiervoor niet vereist. Een belangrijk nadeel is dat het corrigeren van fouten, net zoals bij een beeldopname, nauwelijks mogelijk is. De methode is niet geschikt voor nauwkeurige bewegingen en wordt vooral toegepast bij verfspuiten.

Bij **teach-in programmeren** beschikt de programmeur over een bedieningskastje dat met een lange kabel verbonden is met de besturing. Hiermee stuurt hij de effector van de robot naar het gewenste punt. Vervolgens legt hij dit punt met een druk op de knop vast in het programmageheugen. Daarnaast kunnen andere commando's worden vastgelegd,

bijvoorbeeld voor de af te leggen baan, het openen of sluiten van de grijper en het starten van de lasboog. Het is mogelijk te werken met subroutines en voorwaardelijke sprongen, zoals in een computerprogramma.
Deze methode vraagt veel meer programmeerkennis dan playback programmeren, maar er kan een grotere nauwkeurigheid worden bereikt. Bovendien is het mogelijk om programma's te maken waarbij de robot zich aanpast aan variabele omstandigheden en kunnen fouten worden gecorrigeerd. Teach-in programmeren is momenteel de meest toegepaste methode.
Een nadeel van playback programmeren en teach-in programmeren is dat de robot tijdens het programmeren niet productief is.

Offline programmeren gebeurt los van de robot met behulp van een gespecialiseerde computertaal. De methode is te vergelijken met het programmeren van NC-gereedschapswerktuigen met een programmeertaal (zie paragraaf 13.7.3). Door de gecompliceerde bewegingsmogelijkheden van een robot is dit een lastige opgave. Er worden hoge eisen gesteld aan het ruimtelijk voorstellingsvermogen van de programmeur, vooral om botsingen tussen de robot en zijn omgeving te voorkomen. Grafische simulatie op een beeldscherm kan hierbij zeer nuttig zijn.

13.9.4 Toepassingen van robots

Een industriële robot is voor vele doeleinden te gebruiken. Een robotsysteem is daarentegen altijd bestemd voor een bepaald toepassingsgebied. De bekendste toepassingsgebieden zijn:
- puntlassen, vooral in de auto-industrie;
- booglassen;
- monteren;
- hanteren van producten, laden en lossen van machines, palletiseren (geordend stapelen);
- verfspuiten;
- lijmen, kitten (aanbrengen van een rups lijm of kit bij het monteren);
- testen en kwaliteitscontrole;
- lichte bewerkingen zoals boren en afbramen, of scheidende bewerkingen, bijvoorbeeld waterstraalsnijden.

Uit het oogpunt van kosten kunnen robots alleen worden ingezet waar hun flexibiliteit wordt benut voor:
- het fabriceren van kleine series;
- het uitvoeren van handelingen die te complex zijn om op andere wijze te automatiseren (bijvoorbeeld de bewegingen die nodig zijn voor het puntlassen van een autocarrosserie).

Andere redenen om robots in te zetten kunnen zijn:
- het uitvoeren van gevaarlijke, ongezonde of geestdodende werkzaamheden;
- het opvangen van tekorten aan vakbekwaam personeel, bijvoorbeeld lassers;
- het bereiken van een constante kwaliteit, zoals bij laswerk.

Bij het monteren zorgen machines voor het positioneren van onderdelen ten opzichte van elkaar en voor het vastleggen van deze positie, het verbinden.
- **Pick-and-place-eenheden** kunnen van verschillende posities onderdelen oppakken en deze snel naar de geprogrammeerde positie brengen (zie figuur 13.54). Hierdoor kan een groot aantal onderdelen in korte tijd gemonteerd worden. Dit zie je bijvoorbeeld bij het plaatsen van elektrische componenten op printplaten. In de meeste gevallen vereist deze beweging een 2½D-puntbesturing. Het aanbrengen van de verbinding zelf (bijvoorbeeld het doseren van lijm of solderen) gebeurt dan ook automatisch. Met een robotarm met numerieke besturing kan dat weer op verschillende posities gebeuren.



Figuur 13.54 Een snelle en nauwkeurige flexibele pick-and-place-eenheid met 6 vrijheidsgraden (IRB 340 FlexPicker ™ van ABB)

- Voor montage van mechanische producten in grote serie worden vaak NC-robots ingezet. Het is gewenst dat de robot een zekere mate van compliantie bezit om onderdelen zonder beschadiging in elkaar te kunnen schuiven. Dit maakt de SCARA-robot bijzonder geschikt voor deze toepassing (zie paragraaf 13.9.2). Voor dergelijke montagehandelingen is minimaal 2½D-besturing noodzakelijk.

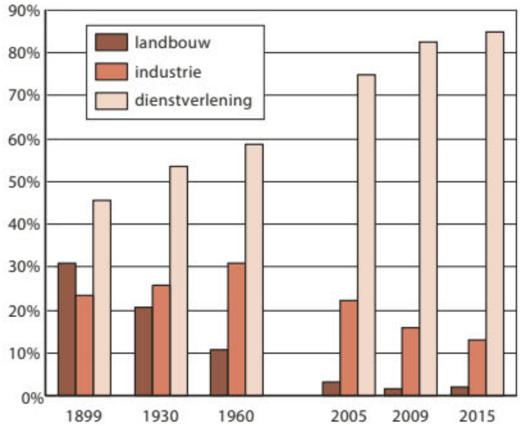
13.10 Gevolgen van automatisering

Ter afsluiting van dit hoofdstuk willen we hier enige opmerkingen plaatsen over de **sociale aspecten** van de automatisering van de productie. Automatisering grijpt sterk in op de werksituatie van de werknemers. Dit geldt trouwens niet alleen voor productiewerkzaamheden, maar ook, en misschien nog wel sterker, voor organisatorische en administratieve werkzaamheden.

Bij automatisering nemen machines werkzaamheden van de mens over. Dit betekent dat een functie zoals deze tot dan toe werd vervuld, geheel of gedeeltelijk verloren gaat. Al in paragraaf 1.1 schreven we over de weerstand van de werknemers tegen de invoering van automatisch werkende weefgetouwen uit vrees voor het verlies van hun baan.

Sinds het begin van de industriële revolutie is de **productiviteit**, dus de hoeveelheid producten die een werknemer per tijdseenheid kan fabriceren, gestegen met een factor van tenminste 100. Toch heeft dit, op de langere termijn, niet geleid tot massale werkloosheid. Hogere productiviteit leidt tot de mogelijkheid om hogere lonen te betalen, dus tot meer koopkracht en meer behoefte aan producten. In de loop van twee eeuwen heeft dit in de westerse industrielanden geleid tot de huidige materiële welvaart, met alle bijbehorende gevolgen.

Productiviteitsverhoging leidt niet alleen tot toename van productie, maar ook tot verschuiving van werkgelegenheid. Deze trend zie je zeer duidelijk terug in figuur 13.55. In de loop van de vorige eeuw is het percentage werkenden in de landbouw in Nederland gedaald van 31 tot 4%, en is sindsdien verder gedaald. Aanvankelijk ving de groei van de industrie deze daling in de werkgelegenheid op. Daarna trad ook in die sector een daling op, zij het minder sterk. Toen werden de particuliere dienst-



Figuur 13.55 Het verloop van de verdeling van de werkgelegenheid in de landbouw, industrie en dienstverlening tussen 1899 en 2015 (CBS)

verlening en de overheid de groeisectoren. Maar ook in deze sectoren wordt op grote schaal geautomatiseerd. Sterke groei van de werkgelegenheid treedt nu in bij de zorgsector en in toenemende mate in de vrijetijdsindustrie.

De gegevens over de werkgelegenheid in bepaalde sectoren gelden op de lange termijn, en zijn weinig richtinggevend voor een bedrijf dat op een gegeven moment een keuze moet maken voor een automatiseringsproject. Verschillende vragen zijn dan van belang, bijvoorbeeld over de economische en technische aspecten, de gevolgen voor de huidige werknemers en de beschikbaarheid van mensen die in de nieuwe situatie nodig zijn.

Op het gebied van werkgelegenheid:
- Kunnen de overbodig geworden werknemers ergens anders in het bedrijf worden geplaatst, eventueel na omscholing?
- Leidt de verbeterde concurrentiepositie tot een vergroot marktaandeel en dus tot productieverhoging, waardoor het verlies aan werkgelegenheid wordt gecompenseerd?

Op het gebied van de kwaliteit van het werk:
- Wat is de inhoud van het resterende werk na de automatisering? De invoering van NC kan leiden tot verlaging van de taakinhoud wanneer het programmeren geheel in de werkvoorbereiding plaatsvindt en daarmee het vakmanschap van de machinebediener overbodig wordt. Het toepassen van werkplaatsprogrammering levert juist een

grote taakverruiming op. Kan het aanwezige personeel dit aan?
- Hoe veranderen de werkomstandigheden? Bij een gedeeltelijk geautomatiseerde montagelijn kan de afstand tussen de resterende werknemers zo groot worden dat het onderlinge contact verloren gaat. Juist dit contact maakt het op zichzelf geestdodende, repeterende werk voor veel mensen aanvaardbaar.

In veel gevallen levert automatisering een aantal hoogwaardige functies op, en daarnaast werk met een zeer laag niveau. Een middencategorie werknemers loopt daardoor gevaar tussen wal en schip te vallen. Het is zaak de wijze van automatisering hierop af te stemmen. Men moet zich afvragen wat wel en wat niet te automatiseren. Wat worden de beslissingsbevoegdheden van de betreffende werknemer?
Automatiseringsbeleid is dus niet los te zien van personeelsbeleid.

Het is van groot belang om de mensen die uiteindelijk het werk moeten doen al in een vroeg stadium volledig te betrekken bij de voorbereiding en bij de uitvoering van automatiseringsprojecten. Projecten waarbij geen optimaal gebruik wordt gemaakt van hun kennis zijn meestal tot mislukken gedoemd, vooral omdat de automatiseerders nooit alle details kunnen overzien.

Vergaande automatisering is in het bedrijfsleven in West-Europa niet meer weg te denken. Veel werkzaamheden kunnen niet meer zonder behulp van computers worden uitgevoerd. Dat geldt zeker in de industriële productie. Nieuwe machines worden vrijwel altijd aangeschaft voorzien van numerieke besturing. Machines voor laser- of waterstraalsnijden of draadvonken bestaan niet zonder numerieke besturing. Afzonderlijke machines maken steeds vaker deel uit van productiesystemen. Dergelijke systemen worden steeds meer opgenomen in netwerken voor het uitwisselen van informatie.

Samenvatting

De structuur van gereedschapswerktuigen volgt logischerwijs uit de functies van de componenten en uit de daaraan gestelde eisen.
Bij starre automatisering wordt de informatie over het product en de bewerking ingevoerd met mechanische middelen, bij flexibele automatisering gebeurt dit met snel verwisselbare informatiedragers. Hierdoor is de toepasbaarheid van automatisering uitgebreid naar kleine productaantallen.
Ook producten met een hoge moeilijkheidsgraad zijn op deze wijze te verwerken.

Numeriek bestuurde machines worden gekenmerkt door:
- het aantal bestuurde assen;
- de mogelijkheden van de besturing;
- de aard van het meetsysteem;
- de mate waarin het totale bewerkingsproces is geautomatiseerd;
- de mate waarin meerdere machines met elkaar zijn verbonden.

Programmeren van numeriek bestuurde machines kan plaatsvinden:
- met de 'hand', alleen geschikt voor zeer eenvoudige toepassingen;
- computergesteund, los van de machine, met behulp van programmeertalen of CAD/(CAPP)/CAM-systemen;
- met machineprogrammering, waarbij de machine in de werkplaats rechtstreeks wordt geprogrammeerd.

Industriële robots zijn vrij programmeerbare manipulatoren. Een robotsysteem bestaat uit de robot met de effector, de besturing en de periferie. Het programmeren van robots kan plaatsvinden met:
- de playbackmethode, het met de hand 'voordoen' van de bewegingen;
- de teach-inmethode, het met een bedieningspaneel verplaatsen van de effector en de bereikte punten opslaan als elementen van de af te leggen baan;
- offline programmeren, het los van de robot programmeren met een speciale computertaal.

Bij het automatiseren in productiebedrijven is het noodzakelijk de gevolgen voor het personeel te beschouwen ten aanzien van de werkgelegenheid, de kwaliteit van het werk en de vereiste kwalificaties van het personeel.
De moderne industriële productie kan vanwege de gevraagde prestaties niet meer zonder automatisering. Een automatiseringsproject kan alleen slagen wanneer het goed past in de bedrijfsdoelstellingen en de rechtstreeks betrokken werknemers vanaf het begin van het project meewerken aan de opzet en de uitwerking ervan.

Literatuur

13.1 Tlusty, G., *Manufacturing Processes and Equipment*, Prentice Hall, 2000, ISBN 978-0-201-49865-3. Hoofdstuk 9 'Design of Machine Tools: Drives, and Structures'; hoofdstuk 10 'Automation'.

13.2 Kief, H.B., *NC/CNC Handbuch 2005/2006*, Carl Hanser Verlag, 2006, ISBN 978-3-446-40039-9.

13.3 Nof, S.Y., *Handbook of Industrial Robotics*, 2nd edition, John Wiley & Sons, 1999, ISBN 987-0-471-17783-8. online gepubliceerd in 2007, ISBN 978-0-470-17250-6.

13.4 Weck, M., Brecher, C., *Werkzeugmaschinen 4: Automatisierung von Maschinen und Anlagen*, 2006, Springer Verlag, ISBN 978-3-540-22507-2.

Oefenvragen

13.1 Omschrijf het begrip flexibiliteit. Op welke manier wordt flexibiliteit verkregen bij
a enkel- en kleinseriefabricage?
b grootserie- en massafabricage?
Welke van deze productiewijzen stelt de hoogste eisen aan de flexibiliteit?

13.2 Wat zijn neventijden? Geef twee voorbeelden van inrichttijden en twee voorbeelden van cyclische neventijden die optreden bij verspanende bewerkingen.

13.3 Noem de vier afzonderlijke kostenposten die bepalend zijn voor de inzet van de verschillende typen draaimachines als functie van de productaantallen. Vergelijk in één grafiek de productkosten als functie van het productaantal voor een revolverdraaimachine en een meerspilautomaat.

13.4 Omschrijf het begrip terugkoppeling.

13.5 Wat wordt bedoeld met een bewerkingscentrum? Wat wordt bedoeld met een draaicentrum? Noem twee voordelen van deze typen machines die niet rechtstreeks met de fabricagekosten te maken hebben en verklaar deze voordelen. Schets een voorbeeld van een product dat geschikt is om te bewerken op een draaicentrum.

13.6 Wat wordt bedoeld met computerondersteund programmeren en wat met machineprogrammeren? Noem de belangrijkste voor- en nadelen van computerondersteund programmeren ten opzichte van machineprogrammeren.

13.7 In welke stappen verloopt het computerondersteund programmeren met een programmeertaal? Wat is hierbij de rol van de postprocessor? Wat is het verschil tussen geometrisch en technologisch georiënteerde programmeertalen?

13.8 Welk type numerieke besturing is noodzakelijk voor een bewerking met standaard gereedschap? Welk type numerieke besturing is noodzakelijk voor een bewerking met een productgebonden gereedschap? Motiveer je antwoord. Zoek voorbeelden (figuren) in het boek om je antwoord mee te illustreren.

13.9 Omschrijf de drie programmeersystemen voor robots. Geef globaal de toepassingsgebieden van deze systemen aan.

13.10 Is het sociaal verantwoord werkgelegenheid te vernietigen door het invoeren van geautomatiseerde productiemethoden? Motiveer je antwoord.

inclusief website!

Op www.industrieleproductie.nl vind je de antwoorden op deze vragen, maar ook extra studie- en oefenmateriaal, zoals video's en meer opgaven.

14 Productievoorbereiding

In dit hoofdstuk geven we het belang aan van de productievoorbereiding in uiteenlopende situaties.
We beschrijven de uit te voeren taken en in het bijzonder de werkwijze bij het bepalen van de fabricagemethode bij eenvoudige onderdelen. We geven concrete richtlijnen voor het uitwerken van een gedetailleerde werkvoorbereiding voor het verspanend bewerken van giet- en smeedstukken en we behandelen vormen van computerondersteuning bij de uitvoering daarvan.
We sluiten het hoofdstuk af met de behandeling van twee uitgewerkte voorbeelden van de werkvoorbereiding voor het gieten en het verspanend bewerken van een eenvoudig werkstuk en voor het uitsnijden en buigen van een plaatwerkstuk.

14.1 De betekenis van de productievoorbereiding

Producten worden gemaakt door een reeks van verschillende, elkaar opvolgende, bewerkingen. Het hele samenstel van bewerkingen noemt men de **fabricagemethode**.

Het ontwerpen van producten heeft veel overeenkomsten met het ontwerpen van fabricagemethoden om die producten te maken. Aan producten worden veel uiteenlopende eisen gesteld. De belangrijkste eis is dat het product optimaal is afgestemd op de behoeften van de klant, zoals we in hoofdstuk 12 al zagen.

Ook aan een fabricagemethode worden veel verschillende eisen gesteld. De belangrijkste eis is dat de fabricagemethode optimaal is afgestemd op de beschikbare mogelijkheden van de machines, de mensen en de overige hulpmiddelen. Maar ook de afstemming van de methode op de kenmerken van het product is belangrijk.

De aanwezigheid van een groep capabele en goed ingewerkte mensen die goed kunnen samenwerken, is ongetwijfeld de belangrijkste bijdrage aan het goed functioneren van een productiebedrijf. In vergelijking met machines zijn mensen echter zeer universeel inzetbaar. Daardoor wordt in de praktijk het functioneren van een productiebedrijf toch meestal grotendeels bepaald door de mogelijkheden van de aanwezige productiemiddelen. Daarom noemden we deze toch als eerste.

De bedrijfsprocessen ‘ontwerpen van producten’ en ‘ontwerpen van fabricagemethoden’ gaan beide vooraf aan de eigenlijke fabricage. Ze behoren tot de (eenmalige) voorbereidende activiteiten. Bij beide activiteiten komen zowel creatieve als routinematige werkzaamheden voor. In beide gevallen kunnen we een aantal opeenvolgende fasen onderscheiden. Beide activiteiten hebben een sterk iteratief karakter; gedurende de voortgang terugspringen naar eerdere fasen komt regelmatig voor, omdat een genomen beslissing verderop tot problemen kan leiden.

Het ontwerpen van fabricagemethoden wordt meestal aangeduid met **productievoorbereiding** of **fabricagevoorbereiding**. In het Engels wordt de term ‘*process planning*’ gebruikt. Het woord ‘planning’ heeft hier dus een andere betekenis dan het Nederlandse woord ‘planning’ (het bepalen van het tijdstip waarop activiteiten moeten plaatsvinden).

Productievoorbereiding is een veelzijdig vakgebied dat meestal wordt uitgeoefend door werktuigbouwkundigen op mbo- en hbo-niveau. Naast algemene kennis van de productietechniek hebben deze werktuigbouwkundigen een ruime bedrijfservaring nodig, en gedetailleerde kennis over de mogelijkheden van het bedrijf waar zij werken. De productievoorbereiding neemt als bedrijfsfunctie een centrale plaats in binnen productiebedrijven. Zij communiceert met vele andere bedrijfsfuncties, zoals product- en procesontwerp, productiebesturing, kostprijsberekening, fabricage, inkoop en kwaliteitsdienst (zie figuur 15.3). Omdat de

maakbaarheid van producten grote invloed heeft op de kostprijs, moet met name de ontwerper een goed inzicht hebben in de consequenties van materiaalkeuze en vormgeving voor de te kiezen fabricagemethode. Omdat het hem aan gedetailleerde fabricagekennis zal ontbreken, moet hij intensieve contacten met de productievoorbereiding onderhouden.

Bij de productievoorbereiding kunnen zich twee verschillende situaties voordoen:

- Men moet het beschouwde product, of een productfamilie, maken met al beschikbare productiemiddelen, waarvan de mogelijkheden goed bekend zijn. In deze situatie heeft de fabricagevoorbereiding een nogal routinematig karakter, al blijft veel creativiteit een vereiste. Men kan gebruikmaken van eerder opgedane ervaringen, die wellicht gedeeltelijk zijn vastgelegd in regels, tabellen en computerprogramma's. Men spreekt in dit geval van **werkvoorbereiding**.
- Er wordt naar de best mogelijke fabricagemethode gezocht voor een nieuw product, of voor een nieuwe productfamilie, en men wil zich daarbij niet op voorhand beperken tot de al beschikbare capaciteiten. In dergelijke omstandigheden moet men op creatieve wijze de mogelijkheden onderzoeken van allerlei fabricagemethoden die in aanmerking komen en daaruit een keuze maken. Dit kan belangrijke investeringen in nieuwe gereedschappen, machines en zelfs hele fabrieken tot gevolg hebben. Deze activiteit wordt vaak aangeduid met **productieontwikkeling**.

Werkvoorbereiding doet zich vooral voor bij de kleinseriefabricage van nieuwe leden van bestaande productfamilies. Dit is de typische situatie in machinefabrieken waar kapitaalgoederen, zoals productiemachines, scheepsdieselmotoren of specialistische apparatuur voor ziekenhuizen en laboratoria, worden vervaardigd. Productieontwikkeling treedt op wanneer geheel nieuwe producten of productfamilies gefabriceerd moeten worden. Dit kunnen producten zijn met afwijkende materialen, vormen en productafmetingen, of hogere nauwkeurigheden. Het kan ook voorkomen dat een nieuw ontwerp in zeer grote aantallen vervaardigd moet worden. Denk hierbij bijvoorbeeld aan een personenauto of een ander consumentenproduct. Het is dan zinvol de fabricagemethode op basis van de nieuwste inzichten te optimaliseren. Soms maken nieuwe ontwikkelingen in de productietechniek het noodzakelijk om de productiemethode ingrijpend te herzien. Dit kan ook gebeuren bij bestaande producten. Een goed voorbeeld hiervan vinden we ook in dit geval in de automobielindustrie. Voor nieuwe automodellen wordt vaak een geheel nieuwe fabriek gebouwd. Daarom bedraagt de investering in een nieuw model personenauto vaak enkele miljarden euro's.

Vroeger ging de productievoorbereiding zich pas verdiepen in de fabricagemethode als het ontwerp helemaal gereed was. Tegenwoordig streeft men ernaar om product- en productieontwikkeling zo veel mogelijk gelijktijdig en in nauwe samenhang met elkaar te laten verlopen. Dit noemen we **concurrent engineering** of **simultaneous engineering**. Deze aanpak lichten we in hoofdstuk 16 toe aan de hand van twee voorbeelden.

In dit hoofdstuk richten we ons voornamelijk op de werkvoorbereiding, oftewel het opstellen van de fabricagemethode bij beschikbare productiemiddelen.

14.2 Stadia in het voortbrengingsproces

Er bestaan nagenoeg oneindig veel verschillende producten en fabricagemethoden. Toch kunnen we in de fabricage een aantal steeds voorkomende stadia onderscheiden. Deze stadia zijn:

- De materiaalbereiding, de winning en bereiding van het primaire materiaal. Deze activiteiten vinden plaats in gespecialiseerde bedrijven. De vormgeving van het materiaal is meestal niet van belang. De materialen worden meestal in ruwe blokken met een aangegeven massa geleverd.
- De primaire vormgeving, het verwerken van het materiaal tot een halffabricaat door middel van oervormen en massief omvormen. Onder primaire vormgeving kan men echter ook verstaan het samenvoegen van delen voorgevormd materiaal door middel van lassen, solderen of lijmen. Zo ontstaat een machineframe door het aan elkaar lassen van stukken staalplaat. Dit samengestelde ruwe onderdeel wordt vervolgens verder bewerkt.
- De secundaire vormgeving, het bewerken van een halffabricaat tot een onderdeel. Dit kan gebeuren door middel van omvormen, scheiden of afnemen.
- De materiaalbehandeling, het transformeren van materiaaleigenschappen zodat de materiaal-

eigenschappen worden bereikt die voor de bewerking of de functie van het product vereist zijn.
- De oppervlaktebehandeling, gericht op het realiseren van de gewenste eigenschappen van het werkstukoppervlak door het aanbrengen van lagen of het veranderen van de eigenschappen van de oppervlaktelaag. Ook afbramen en reinigen horen bij de oppervlaktebehandelingen.
- De montage, het combineren van onderdelen tot een samengesteld product. Verbindingstechnieken spelen hierbij een belangrijke rol.

Een fabricagemethode bestaat dus uit een aantal opeenvolgende bewerkingsstappen. Het aantal stappen kan variëren van 1 tot meer dan 50. Het is noodzakelijk de stappen zorgvuldig op elkaar af te stemmen. Het resultaat van een bepaalde stap wordt vaak in hoge mate bepaald door dat van de voorafgaande stappen. Dit geldt voor de beheersing van de materiaaleigenschappen, en voor de beheersing van de geometrie.

14.3 De werkvoorbereiding

In deze paragraaf bespreken we de taken van de werkvoorbereiding en het bewerkingsplan.

14.3.1 Taken van de werkvoorbereiding

De werkvoorbereiding geeft min of meer gedetailleerd aan welke bewerkingen in de opeenvolgende stadia toegepast zullen worden. De materiaalbereiding op zich staat daar meestal buiten. De keuze van het uitgangsmateriaal en van de primaire vormgevingsmethode wordt vaak al bepaald door de ontwerper. Deze kiest bijvoorbeeld voor een gegoten of een gelast machineframe. Hij legt hiermee in feite de fabricagemethode in hoofdlijnen vast, ook al vermeldt hij dit niet duidelijk.
De afdeling werkvoorbereiding moet de ideeën van de ontwerper verder uitwerken. Deze ideeën zijn vastgelegd in de vormgeving van het te maken product. De eerste beslissing is de keuze van de primaire vormgevingsmethode (als deze nog niet vastligt). Een stalen as kan bijvoorbeeld vervaardigd worden uit gewalst stafmateriaal door verspanen (in hoofdzaak draaien). Een alternatief is om eerst te smeden en daarna pas te verspanen. Een belangrijke vraag hierbij is of het product in eigen bedrijf zal worden vervaardigd of dat het werk beter geheel of gedeeltelijk bij een gespecialiseerd bedrijf kan worden uitbesteed. Dit staat bekend als de **make-or-buy-beslissing** (zie ook paragraaf 17.5). De laatste decennia specialiseren productiebedrijven zich steeds meer. Ze beperken zich steeds vaker tot een klein deelgebied van het voortbrengingsproces in de hoop daarmee voordelen te behalen zoals lage kosten, snelle levering en hoge kwaliteit. Dit probeert men te bereiken door goede scholing van de medewerkers en investeringen in hoogwaardige machines en andere productiemiddelen. De make-or-buy-beslissing krijgt daarmee steeds meer het karakter van een strategische beslissing. Dit is iets anders dan een gelegenheidsbeslissing, die genomen wordt omdat men niet over een bepaalde machine beschikt of omdat een geschikte machine overbezet is.

In dit hoofdstuk richten we ons in het bijzonder op een verspanende afdeling. Op deze afdeling moeten een aantal vlakken van smeed- en gietstukken worden bewerkt, omdat bij de vervaardiging van deze halffabricaten niet voldaan kan worden aan de gestelde eisen op het gebied van geometrische nauwkeurigheid of oppervlaktekwaliteit.

Achtereenvolgens moet de werkvoorbereiding vaststellen:
- in welke volgorde de benodigde bewerkingen dienen te worden uitgevoerd;
- welke machines, opspanmiddelen, verspanende gereedschappen en verspaningscondities daarvoor het beste kunnen worden gebruikt;
- welke instel- en bewerkingstijden nodig zijn bij de gekozen bewerkingsmethode (dit ten behoeve van de afdelingen calculatie en planning);
- welke gereedschappen en halffabricaten moeten worden aangeschaft, of ontworpen en vervaardigd.

Uiteraard probeert men de kostprijs van de producten zo laag mogelijk te houden. Geen van de taken die we hebben genoemd kan goed worden uitgevoerd als er op de productieafdeling geen totaaloverzicht van de processen en de machines beschikbaar is.

In de resterende paragrafen van dit hoofdstuk behandelen we voornamelijk de vervaardiging van verspanend bewerkte producten en van plaatwerkproducten. Voor andere bewerkingsmethoden gelden soortgelijke richtlijnen.

14.3.2 Het bewerkingsplan

Het **bewerkingsplan** is onder te verdelen in een macro- en een microbewerkingsplan. De **macrowerkmethode** is het deel van het bewerkingsplan dat alleen door de werkvoorbereider kan worden gemaakt, omdat alleen hij het totaaloverzicht over alle bewerkingsstappen heeft. Dit betekent dat hij de bewerkingsstappen per opspanning aangeeft, inclusief de productgebonden spangereedschappen die daar eventueel bij nodig zijn. De **microwerkmethode** omschrijft de bewerkingsvolgorde binnen de verschillende opspanningen. Het gaat dan bijvoorbeeld om de keuze van niet-productgebonden gereedschappen en, in het geval van verspanen, om de verspaningscondities. In de kleinseriefabricage wordt de bepaling van de microwerkmethode meestal aan de bedieningsvakman overgelaten. Dit geldt ook voor het machineprogrammeren van NC-machines (zie hoofdstuk 13).
In de massafabricage is het nodig dat de werkvoorbereiding ook de microwerkmethode verregaand optimaliseert. Hand- of computerprogrammering van NC-productiemachines vindt hier eveneens plaats binnen de werkvoorbereiding.

Bij de keuze van de werkmethode spelen vele aspecten een rol. Onder andere:
- de grootte van de totaalserie en van de fabricageserie (zie hoofdstuk 17);
- het werkstukmateriaal (voor de keuze van snijmaterialen en verspaningscondities);
- afmetingen en vorm van het werkstuk (van de uitgangsvorm en van de gewenste eindvorm);
- maat-, vorm- en plaatsnauwkeurigheid en de ruwheid;
- de af te nemen hoeveelheid werkstukmateriaal;
- kennis en ervaring van het personeel;
- de beschikbare machines en gereedschappen (soorten, afmetingen, nauwkeurigheid);
- de ruimte voor transport en tussenopslag;
- de levertijd;
- het totale werkaanbod.

14.4 Vereenvoudigde richtlijnen

Voordat we meer in detail op het bewerkingsplan ingaan, bespreken we in deze paragraaf enkele vereenvoudigde richtlijnen die bij het uitwerken van opdrachten kunnen worden gebruikt. Deze richtlijnen betreffen het opspannen van werkstukken, de haalbare maatnauwkeurigheden en oppervlaktekwaliteiten en de bewerkingsstappen die nodig zijn om deze resultaten te verkrijgen. Een gedetailleerde keuze van gereedschappen en verspaningscondities laten we buiten beschouwing.

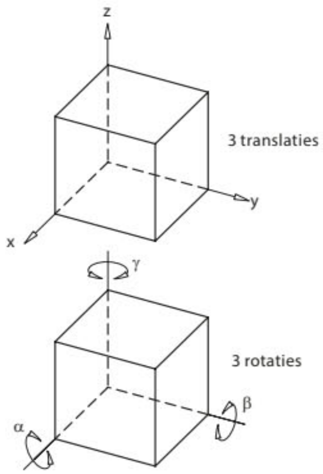
14.4.1 Het opspannen van werkstukken

Voor het verspanen moeten de werkstukken bevestigd worden op het gereedschapswerktuig. Dit wordt **opspannen** of kortweg **spannen** genoemd. Het bepalen van de juiste spanmethode is een belangrijk onderdeel van de werkvoorbereiding. Al bij het ontwerpen van een product moet men rekening houden met het feit dat het werkstuk zo moet kunnen worden opgespannen dat de gewenste eindvorm kan worden gerealiseerd, zonder al te veel moeite en met voldoende nauwkeurigheid. Dit is vooral van belang bij giet- en smeedstukken. Deze kunnen bijvoorbeeld worden voorzien van speciale nokken ten behoeve van het opspannen.

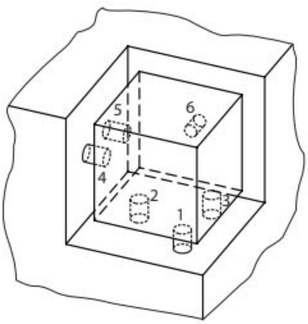
Het opspannen vervult drie hoofdfuncties:
- **positioneren**: het werkstuk op zijn plaats brengen;
- **klemmen**: het werkstuk op zijn plaats houden;
- **ondersteunen**: het tegengaan van elastische of plastische vervormingen van het werkstuk.

We bespreken deze hoofdfuncties verderop in deze paragraaf.

Het spangereedschap moet:
- het werkstuk nauwkeurig en eenduidig positioneren;
- voldoende klemkracht leveren;
- weerstand bieden tegen beschadiging en vervorming van oplegpunten en -vlakken;
- het mogelijk maken producten snel en gemakkelijk te wisselen;
- het mogelijk maken spanen en koelmiddel gemakkelijk te verwijderen;
- een veilige werksituatie bieden voor de bedieningsman;
- zo nodig zorgen voor de balancering van de opspanning van draaidelen;
- geschikt zijn voor een grote verscheidenheid aan producten; dit geldt uiteraard niet voor productgebonden spanmiddelen (ook wel **stelstukken** genaamd).



Figuur 14.1 De zes vrijheidsgraden



Figuur 14.2 Positioneren op 6 oplegpunten

We bespreken in deze paragraaf ook verschillende spanmiddelen: voor draaibewerkingen, voor niet-roterende werkstukken en roterende spantafels.

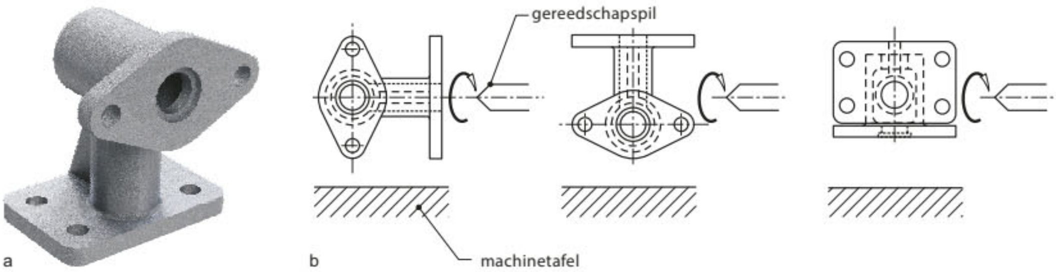
Positioneren

Het positioneren heeft tot doel de plaats en de stand van het werkstuk tijdens het bewerken ondubbelzinnig vast te leggen. De spaninrichting moet zo zijn geconstrueerd dat alle werkstukken bij het opspannen in dezelfde positie komen. Dit is vooral van belang in de serie- en massafabricage. Een lichaam in de ruimte heeft zes vrijheidsgraden: drie translaties en drie rotaties. Als voorbeeld nemen we het blokje uit figuur 14.1. De positie van dat blokje kan met de coördinaten van een punt (x, y en z) en de hoeken α, β en γ worden aangegeven. Het blokje kan met zes oplegpunten worden gepositioneerd (zie figuur 14.2). De positie van het ondervlak is bepaald door de **oplegpunten** 1, 2 en 3 (1 translatie en 2 rotaties geblokkeerd). De positie van een zijvlak is bepaald door de oplegpunten 4 en 5 (1 translatie en 1 rotatie geblokkeerd). Ten slotte ontneemt oplegpunt 6 het blokje alle bewegingsvrijheid (laatste translatie geblokkeerd). Deze wijze van positioneren staat bekend als de **3-2-1-methode**. Het resultaat is een **statisch bepaalde oplegging**.

Als hulpmiddel voor het positioneren wijst de werkvoorbereider drie vlakken van het werkstuk aan als **referentievlakken**. Dit zijn drie onderling loodrechte vlakken die dienen als basis voor de maatvoering van het werkstuk en voor het aangeven van de vorm- en plaatstoleranties van de bewerkingen. Als referentievlakken komen allereerst de werkstukvlakken in aanmerking die door de ontwerper al extra functionaliteit hebben gekregen. Dit kunnen werkelijk voorkomende vlakken zijn, zoals een vlak dat aansluit op een ander onderdeel, een vlak dat voor de maatvoering benut wordt of een vlak dat een centrale functie van het onderdeel vervult (bijvoorbeeld een gat). Ook denkbeeldige vlakken doen echter vaak dienst als referentievlak. Het gaat dan bijvoorbeeld om symmetrievlakken. In figuur 14.26 hebben we de referentievlakken R1, R2 en R3 aangegeven.

De **aanslagvlakken** van het werkstuk zijn de vlakken die bij het spannen de oplegpunten raken. Deze vlakken kunnen tevens als referentievlak dienen. Wanneer de posities van de aanslagvlakken van het werkstuk onnauwkeurig zijn ten opzichte van de te bewerken vlakken, kan het nodig zijn de oplegpunten van het spangereedschap instelbaar te maken. Dit kan voorkomen bij giet- of smeedstukken. Op deze wijze kan men de referentievlakken **uitlijnen** ten opzichte van de machinebewegingen.

De oriëntatie van het werkstuk op de machinetafel ten opzichte van de gereedschapsspil noemt men de **basisconfiguratie**. De basisconfiguratie moet zorgvuldig worden gekozen om een goede bewerkingsvolgorde te verkrijgen. De te bewerken vlakken moeten bereikbaar zijn voor het gereedschap. Een ongunstige basisconfiguratie leidt tot extra opspanningen en brengt het risico van extra opspanfouten met zich mee. Figuur 14.3 toont een aantal basisconfiguraties van een werkstuk.



Figuur 14.3 Een werkstuk (a) met drie mogelijke basisconfiguraties (b)

Klemmen

Door klemmen moet het werkstuk tijdens het bewerken tegen de 6 oplegpunten blijven rusten. De richting en de grootte van de klemkracht moeten ervoor zorgen dat het werkstuk niet onder invloed van de bewerkingskrachten verschuift of zelfs losschiet. Klemmen veroorzaakt wrijvingskrachten. Deze krachten kunnen het mogelijk maken een of meer oplegpunten te laten vervallen. Dit is bijvoorbeeld het geval bij het spannen in een machineklem (zie figuur 14.11b) of met behulp van V-blokken (zie figuur 14.4).

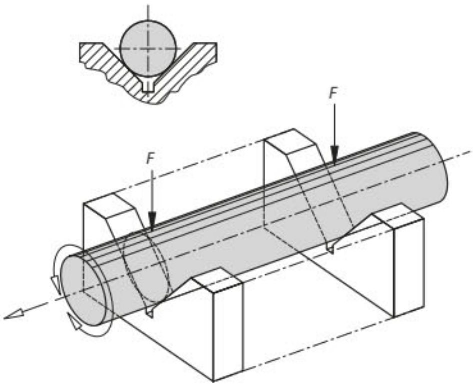
Bij klemmen moet men de krachten zo veel mogelijk rechtstreeks doorleiden naar de oplegpunten. Dit voorkomt het doorbuigen van het werkstuk (zie figuur 14.5).

Ondersteunen

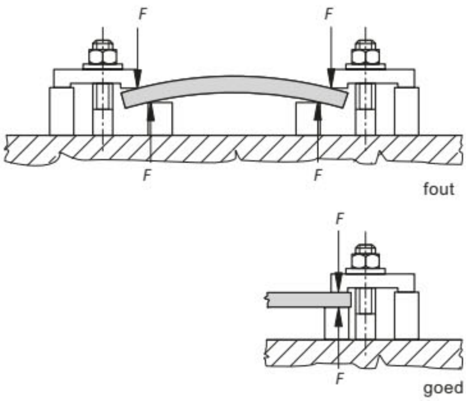
Tot dusver hebben we aangenomen dat het werkstuk onder invloed van het eigen gewicht, de klemkracht en de verspaningskracht niet vervormt. In veel gevallen is dat onjuist. Er moeten dan extra **steunpunten** worden aangebracht. Soms moeten zelfs een of meer oplegpunten worden vervangen door **oplegvlakken** (zie figuur 14.6). In tegenstelling tot de statisch bepaalde oplegging bij 6 oplegpunten, is in deze gevallen sprake van een **statisch onbepaalde oplegging**. Een statisch onbepaalde oplegging ontstaat bij het spannen met een spantang, spandoorn of vierklauw. Bij een dergelijke oplegging is het onvermijdelijk dat de klemkracht het werkstuk vervormt. Steunpunten zijn daarom veelal instelbaar. Alleen voldoende nauwkeurige vlakken van het werkstuk mogen als aanslagvlak worden gebruikt. Dit geldt bijvoorbeeld voor de vlakken die men verkrijgt met verspanende bewerkingen.

Spanmiddelen voor draaibewerkingen

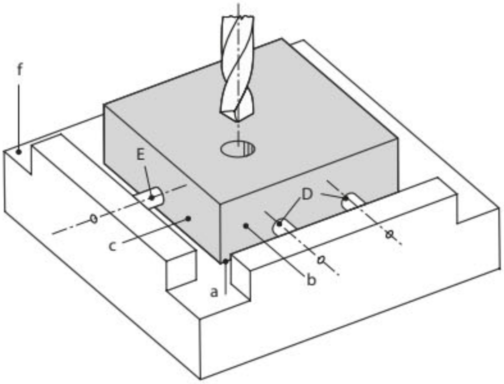
Waar mogelijk worden universele, in de handel verkrijgbare spanmiddelen toegepast. Voor complexe delen of voor grotere aantallen kan het echter noodzakelijk of nuttig zijn om productgebonden spanmiddelen te maken. Deze kunnen vaak opgebouwd worden uit standaardcomponenten.



Figuur 14.4 Opspanning in V-blokken

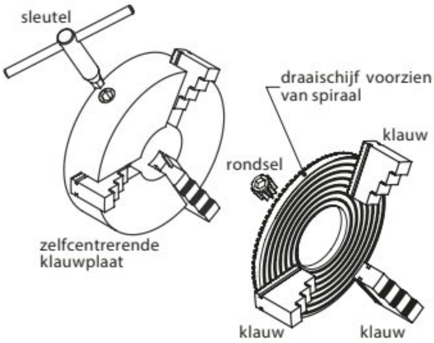


Figuur 14.5 Het voorkomen van doorbuiging door spankrachten



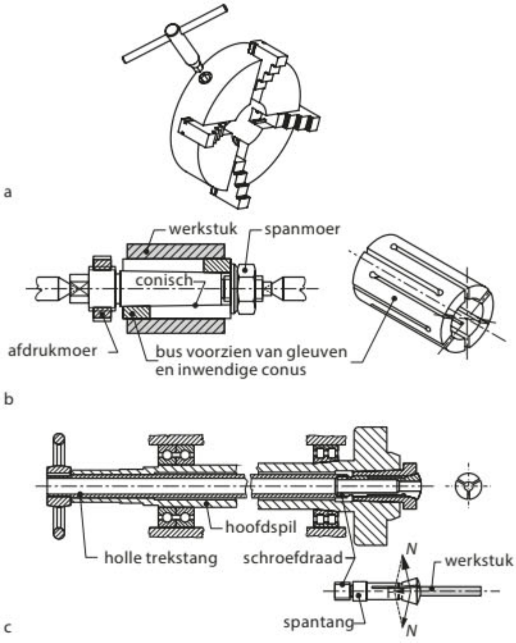
a,b,c voorbewerkte aanslagvlakken
D en E oplegpunten
f oplegvlak

Figuur 14.6 Werkstuk statisch onbepaald opgelegd op vlak 'a'

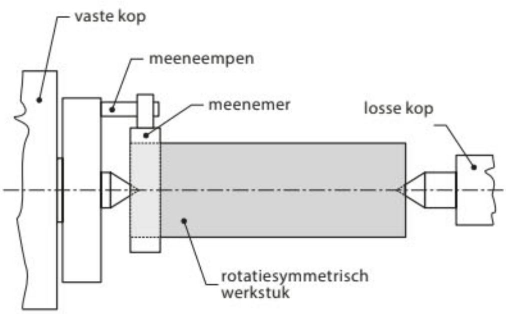


Figuur 14.7 Zelfcentrerende drieklauw

Bij een **zelfcentrerende drieklauw** (zie figuur 14.7) worden de positionering en de klemkracht geleverd door de drie radiale oplegpunten van de klauwen. De verspaningskracht wordt grotendeels door wrijving opgenomen. Bij een stilstaande machine moet de klemkracht extra groot zijn, omdat bij hoge toerentallen de klemkracht afneemt door de centrifugaalkrachten op de spanklauwen. Dunwandige werkstukken zullen door de sterk geconcentreerde klemkrachten ontoelaatbare vervormingen ondergaan. Door de klemkracht beter over de omtrek van het werkstuk te verdelen, kan de vervorming worden beperkt. Dit is het doel van de **spantang** en de **spandoorn** (zie figuur 14.8). De spantang klemt het werkstuk uitwendig, de spandoorn inwendig.
Bij niet-rotatiesymmetrische werkstukken moet de positie van de klauwen afzonderlijk aangepast kunnen worden aan de vorm van het werkstuk. Daarvoor dient de **vierklauw** uit figuur 14.8a.



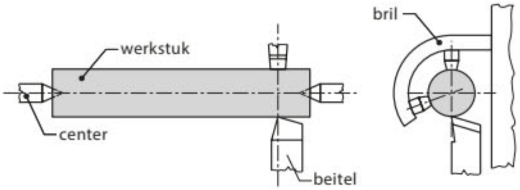
Figuur 14.8 Spanmiddelen voor draaidelen: vierklauw (a), spandoorn (b), spantang (c)



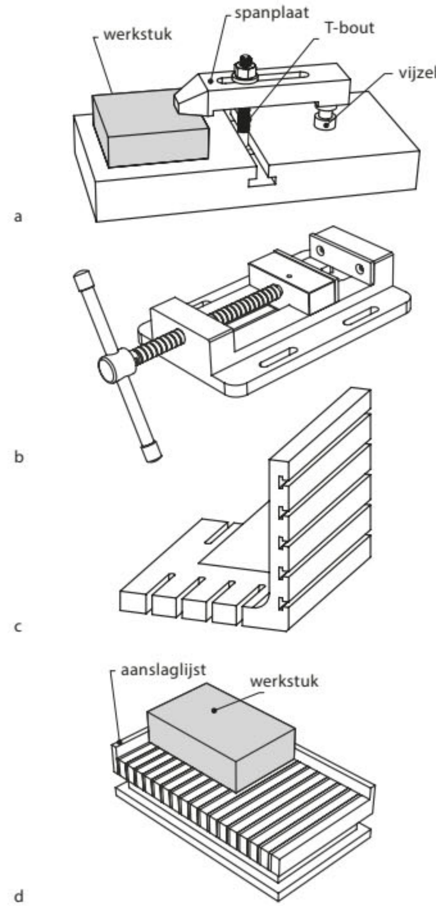
Figuur 14.9 Volledig gecentreerde opspanning van een draaiwerkstuk

Figuur 14.9 toont de opspanning van een cilindrisch werkstuk tussen de centers van een draaimachine. Hiermee is het werkstuk eenduidig gepositioneerd, maar voor lange werkstukken is deze opspanning onvoldoende. Onder invloed van de verspaningskracht buigt een slank werkstuk te veel door (zie figuur 5.43). Daarom worden in dat geval de extra steunpunten van een **bril** gebruikt (zie figuur 14.10). Deze bril dient als ondersteuning en is niet bedoeld om het werkstuk te positioneren.

Een drieklauw met **zachte klauwen** (zie figuur 14.29e) wordt bij draaidelen toegepast om beschadiging van al eerder bewerkte vlakken te voorkomen. De drieklauw wordt hierbij voorzien van verwisselbare opzetklauwen, die vervolgens op de diameter van het spanvlak worden afgedraaid.



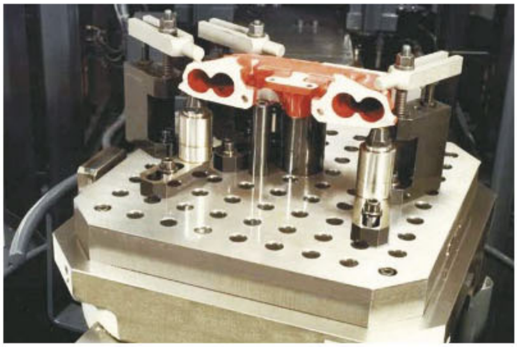
Figuur 14.10 Voorkomen van vormfout bij een lang draaiwerkstuk door ondersteuning met een meelopende bril



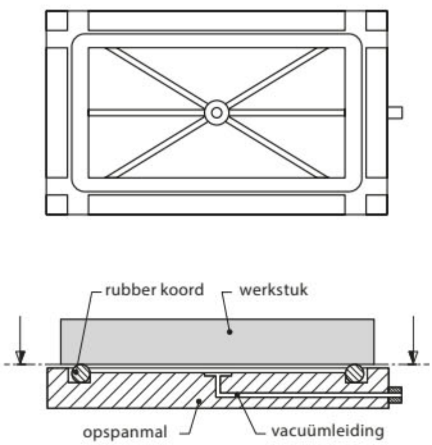
Figuur 14.11 Spanmiddelen voor niet-roterende werkstukken: spanplaat met T-bout en vijzel (a), machineklem (b), hoekplaat (c) en magnetische spanplaat (d)

Spanmiddelen voor niet-roterende werkstukken

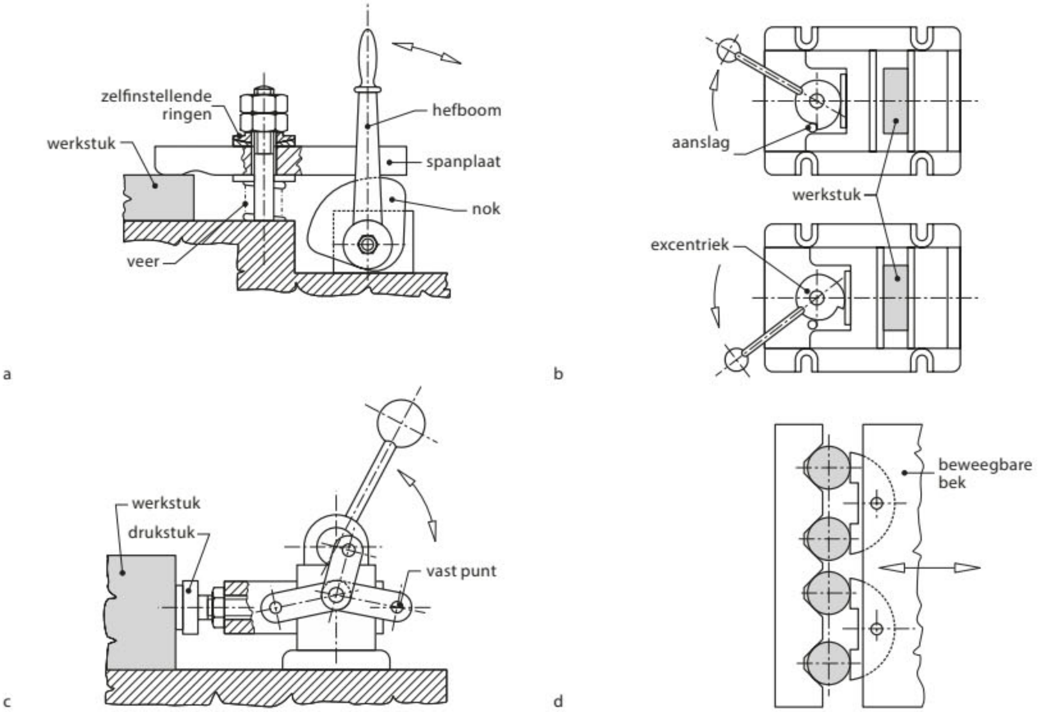
Bij bewerkingen waarbij het snijgereedschap de hoofdbeweging uitvoert, worden de volgende spanmiddelen het meest toegepast: de **spanplaat** met **T-bout** en **vijzel** (zie figuur 14.11a), en de **machineklem** (zie figuur 14.11b). In sommige gevallen is het nodig een product op een verticaal vlak te spannen terwijl de machinetafel horizontaal staat of omgekeerd. Dit is op te lossen met een **hoekplaat** (zie figuur 14.11c). Zie voor een toepassingsvoorbeeld van een hoekplaat figuur 14.29d. De magnetische spanplaat (zie figuur 14.11d) wordt voornamelijk op slijpmachines toegepast, omdat een beperkte spankracht hier voldoende is om het werkstuk op zijn plaats te houden, tegen de bewerkingskrachten in.



Figuur 14.12 Werkstuk opgespannen op een stelstuk opgebouwd uit standaardelementen (KIPP)



Figuur 14.13 Vacuümspanmal



Figuur 14.14 Verschillende snelspaninrichtingen met snelspanmechanismen

Enkele voorbeelden van productgebonden spanmiddelen zijn:
- het stelstuk, bij voorkeur opgebouwd uit standaardcomponenten (zie figuur 14.12);
- de **vacuümspanmal** voor producten met een groot oplegvlak (zie figuur 14.13). Deze maakt het product uit alle richtingen, op de onderkant na, bereikbaar voor bewerking;
- de **boormal** (zie figuur 5.64). Deze mal heeft een extra functie, namelijk het geleiden van het bewerkingsgereedschap.

Voor het vergroten van de klemkracht en voor het verkorten van de opspantijd worden hulpmiddelen gebruikt, waaronder schroefspillen, hefbomen en excenters (zie figuur 14.14). Ook maakt men gebruik van pneumatische en hydraulische cilinders en van elektromagneten. Daarmee wordt centrale bediening mogelijk vanuit het gereedschapswerktuig. Het is belangrijk dat bij het wegvallen van de druk of de spanning de spankracht behouden blijft.

Roterende spantafels

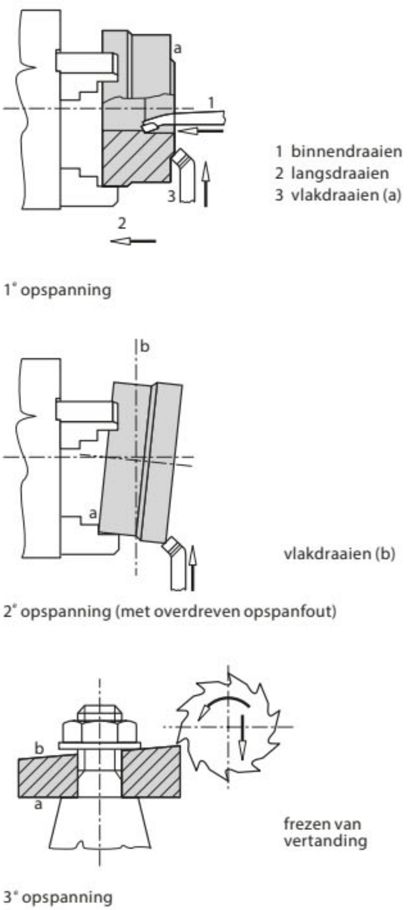
Door het gebruik van roterende spantafels is het mogelijk producten aan meer zijden te bewerken zonder omspannen. Bovendien levert dit extra vormgevingsmogelijkheden op. We kunnen de volgende roterende spantafels onderscheiden:
- tafels met een of twee rotatieassen;
- **indexeertafels**, tafels die een aantal vaste posities kunnen innemen. Tijdens het roteren is bewerken niet mogelijk;
- **draaitafels** die elke willekeurige stand kunnen innemen; deze zijn onder te verdelen in:
- **handbediende draaitafels**. Deze tafels worden in een gegeven stand vastgezet. Ook hier is bewerken tijdens het roteren niet mogelijk;
- **numeriek bestuurde draaitafels** (zie figuur 13.22). Deze tafels kunnen met behulp van de numerieke besturing van de machine roteren om een of zelfs twee assen, ook tijdens het bewerken. Deze kostbare oplossing biedt zeer veel mogelijkheden voor vormgeving en maakt het efficiënter bewerken van complexe werkstukken mogelijk.

De spanmiddelen voor bewerkingsgereedschappen laten we hier buiten beschouwing. Sommige gereedschappen worden rechtstreeks op de machine bevestigd. Dit geldt voor draaibeitels en sommige typen frezen. Meestal zijn er echter allerlei koppel- en verloopstukken nodig. Aan deze gereedschaps-

delen worden hoge eisen gesteld op het gebied van nauwkeurigheid, stijfheid en duurzaamheid.

14.4.2 Keuze van de opspanningen

Met een spanmiddel zijn verschillende basisconfiguraties mogelijk. Door het gebruik van een draaitafel kan het aantal benodigde basisconfiguraties vaak beperkt worden. De keuze van het vlak dat het eerst moet worden bewerkt is belangrijk. In het ideale geval kan dit vlak gebruikt worden als aanslagvlak of referentievlak voor volgende bewerkingen. Bij elke volgende opspanning ontstaan opspanfouten. Productgebonden spanmiddelen zijn kostbaar en omspannen kost extra tijd en geld. Men streeft daarom steeds naar een zo klein mogelijk aantal opspanningen. Daarvoor dienen de te bewerken vlakken in groepen te worden bijeengebracht. Zoals we hierna nog zullen toelichten, baseert men zich hierbij op de vorm van het product en op de vormen van de te bewerken vlakken. Het gevolg van deze aanpak is vaak dat de bewerkingsmogelijkheden sterk worden beperkt. Dit geldt in het bijzonder voor het gebruik van machines en gereedschappen. Bij moderne NC-machines, zoals bewerkingscentra en draaicentra, zijn de mogelijkheden om veel bewerkingen in één opspanning uit te voeren aanmerkelijk uitgebreid.



Figuur 14.15 De keuze van de opspanningen van een blenk voor een tandwiel

In figuur 14.15 zie je een voorbeeld van een in twee opspanningen gedraaide schijf, waaruit vervolgens een tandwiel wordt vervaardigd. Het vlak a is samen met de boring in één opspanning gedraaid. De werkvoorbereider moet ervoor zorgen dat dit vlak bij de derde opspanning als aanslagvlak wordt gebruikt. Onnauwkeurigheden die worden veroorzaakt door het omspannen op de draaimachine, hebben dan geen invloed op de nauwkeurigheid van het tandwiel.

Voor het spannen gelden de volgende regels:
- kies bij ruwe halffabricaten als eerste opspanning altijd een statisch bepaalde opspanning;
- kies voor de eerste bewerking een vlak dat bij volgende opspanningen als referentievlak kan dienen;
- verspanend bewerkte vlakken mogen als aanslagvlak worden gebruikt bij statisch onbepaald opspannen;
- combineer zo veel mogelijk bewerkingen in één opspanning.

14.4.3 Nauwkeurigheid en ruwheid

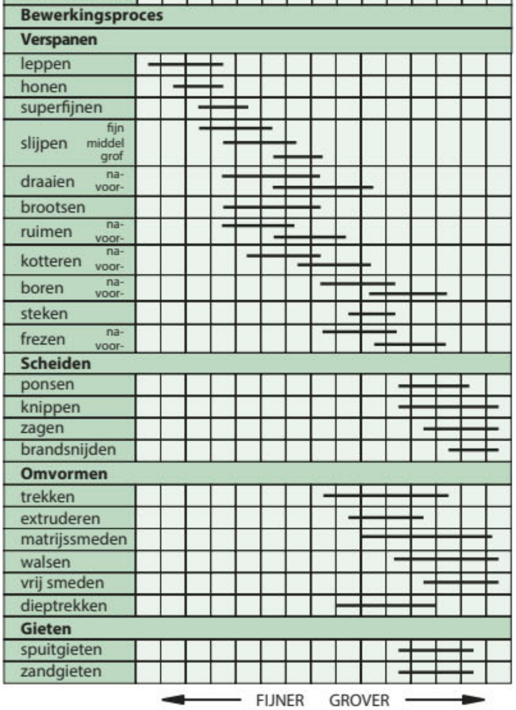
Voor een verdere beperking van het aantal mogelijke bewerkingen is het nodig om rekening te houden met eisen op het gebied van maatnauwkeurigheid, vormnauwkeurigheid (zie paragraaf 12.6.2) en de ruwheid (zie paragraaf 12.6.3). In figuur 14.16 hebben we voor een groot aantal vormgevingstechnieken aangegeven welke toleranties haalbaar zijn. Figuur 14.17 toont een dergelijk overzicht voor de ruwheid.

14.4.4 Het aantal bewerkingsstappen en de bewerkingstoeslagen

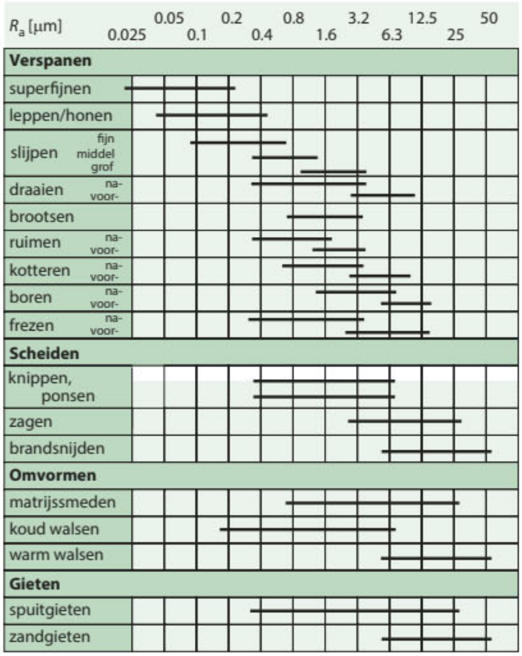
Voor- en tussenbewerkingen

Normaal gesproken wordt de kwaliteit van een product die met een bewerking kan worden bereikt mede bepaald door de uitgangstoestand. Zo kan

nominale maat >	⩽	toleranties [μm]														
1	3	1.2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140	250	400	600
3	6	1.5	2.5	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180	300	480	750
6	10	1.5	2.5	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580	900
10	18	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700	1100
18	30	2.5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330	520	840	1300
30	50	2.5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1000	1600
50	80	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1200	1900
80	120	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1400	2200
ISO standaard-tolerantiekwaliteit		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16



Figuur 14.16 Haalbare toleranties (aangepaste versie van NEN-ISO 2768-1)



Figuur 14.17 Haalbare ruwheden (aangepaste versie van NPR 3638)

van een betrekkelijk onnauwkeurig en ruw vlak (gegoten of gesmeed), niet in één bewerking een zeer nauwkeurig vlak worden vervaardigd. Vrijwel altijd is er een **voorbewerking** nodig, en geregeld één of meer **tussenbewerkingen** noodzakelijk.
Bij voorbewerkingen moet in veel gevallen een behoorlijke hoeveelheid materiaal worden verwijderd. De weg te nemen laag is bovendien niet overal gelijk. De verspaningskrachten zijn dan groot en kunnen sterk variëren. Dit betekent dat er sterke en ongelijkmatige vervormingen kunnen optreden aan de machine, het werkstuk, het gereedschap en de spanmiddelen. Bovendien wordt er veel warmte opgewekt en slijten de gereedschappen sterk. Dit alles leidt tot onnauwkeurigheid. Het is moeilijk om algemene regels te geven over de kwaliteitsverbetering die in één bewerkingsgang bereikt kan worden. Juist hier zijn kennis en ervaring van belang. De kwaliteit wordt bepaald door factoren als productgeometrie, de soort bewerking, de wijze van opspannen, de keuze van de gereedschappen, de instelgrootheden en uiteraard de nauwkeurigheid van de machine. Een stijf werkstuk, een stijve opspanning, een goede onderhoudstoestand van het gereedschapswerktuig, scherpe gereedschappen en kleine snededoorsneden dragen bij aan een grotere nauwkeurigheid.

De volgende sterk vereenvoudigde regels geven enig inzicht in wat voor kwaliteitsverbeteringen haalbaar zijn:
- de ISO-standaardtolerantiekwaliteit (IT) kan per bewerking ongeveer twee klassen beter worden (het kwaliteitscijfer is dan lager);
- de ruwheid kan per bewerking tot ongeveer een derde van de oorspronkelijke waarde worden verminderd.

Bewerkingstoegift

Verspanende bewerkingen vereisen een minimumhoeveelheid te verwijderen materiaal. Deze hoeveel-

heid noemen we de **bewerkingstoegift**. De grootte van de bewerkingstoegift is van veel factoren afhankelijk. De belangrijkste factoren zijn:
- de afmetingen van het product;
- de oppervlaktegesteldheid die het resultaat is van de voorgaande bewerking (smeedhuid, gietkorst enzovoort);
- de optredende vorm- en maatafwijkingen bij smeed- en gietstukken;
- de gekozen bewerkingmethode;
- de materiaalafname die minimaal nodig is voor het verspaningsproces;
- de waarde waarmee de bewerkingstoegift verhoogd moet worden. Deze waarde is afhankelijk van de nauwkeurigheid van de voorafgaande bewerking en zorgt ervoor dat de minimaal vereiste laagdikte op het te bewerken vlak aanwezig is.

Giet- en smeedwerk bestaat in diverse kwaliteitsklassen. Nauwkeuriger werk is duurder, maar dan kan men wel besparen op de bewerkingskosten. Men kan de nominale bewerkingstoegift bij hoogwaardig smeed- en gietwerk kiezen op basis van de sterk vereenvoudigde richtlijnen uit figuur 14.18.

Voorbeeld 1:

Het uitgangspunt is een in zand gegoten onderdeel. De afmetingen van dit onderdeel zijn 50-300 mm, met een ISO-standaardtolerantiekwaliteit 13 (IT 13) en een ruwheid R_a van 25 µm. Het materiaal is een non-ferrolegering. Aan dit voorwerp moet een uitwendige cilinder bewerkt worden met een nominale maat van ø100 mm, kwaliteit IT 7 en ruwheid R_a van 0,8 µm (zie figuur 14.19). Met het oog op de gewenste vorm- en maattolerantie is draaien voldoende (zie figuur 14.16). Vanwege de vereiste ruwheid is nadraaien noodzakelijk (zie figuur 14.17). De uitgangstoestand voor de laatste bewerking, en daarmee het resultaat van de voorlaatste bewerking, moet volgens de regels die we eerder in deze paragraaf hebben vermeld beter zijn dan IT 9 en R_a<2,5 µm. Dat kan bereikt worden met nadraaien. Voor deze bewerking moet de uitgangstoestand IT 11 en R_a = 8 µm zijn. Dit is nog aanzienlijk beter dan die van het ruwe gietstuk, en dus is er nog een extra tussenbewerking noodzakelijk. De bewerkingsvolgorde wordt dus: voordraaien, tussenbewerking, nadraaien.

Indien bij een werkstuk een warmtebehandeling nodig is, moet deze vóór de laatste bewerking plaatsvinden. De bewerkingstoegift ten behoeve van de laatste bewerking moet dan circa twee keer zo groot zijn als we in figuur 14.18 hebben aangegeven.

Voor het bepalen van de totale bewerkingstoegift moet men vanaf het eindresultaat terugrekenen naar de uitgangstoestand. Toepassing van de richtlijnen leidt tot het resultaat weergegeven in figuur 4.19. Bedenk daarbij dat de bewerkingstoegift een laagdikte is. De toe- of afname van de diameter bedraagt dus twee keer de laagdikte. Het is zinloos de gegeven richtlijnen exact aan te houden. De

		Afmeting gietstuk (mm)		
		<50	50-300	>300
Bewerking		bewerkingstoegift (mm)		
eerste bewerking	non-ferrolegeringen	1	2	4
	ferrolegeringen	2	4	8
tweede bewerking	bijv. nadraaien, nafrezen, naboren	0,5	1	2
nabewerking	bijv. ruimen, slijpen (na harden 2 × waarde)	0,1	0,2	0,4
'fijne' nabewerkingen	bijv. honen, leppen	0,05	0,1	0,2

Figuur 14.18 Richtlijnen voor de keuze van de bewerkingstoegift

Bewerking	Bewerkingstoegift (mm)	Resulterende diameter (mm)	IT	Tolerantieveld (µm)	Ruwheid R_a (µm)
nadraaien	0,2	100	7	35	0,8
voordraaien	1	100,4	9	87	2,5
voordraaien	2	103	11	220	8
gieten	-	107	13	540	25

Figuur 14.19 Bewerkingsstappen voor de cilinder ø100 h7, R_a = 0,8 µm

Bewerking	Bewerkingstoegift (mm)	Resulterende diameter (mm)	IT	Tolerantieveld (µm)	Ruwheid R_a (µm)
naruimen	0,1	40	7	25	0,8
voorruimen	0,2	39,8	9	62	2,5
naboren	1	39	11	160	6,3
opboren	2	37	13	390	12,5
gieten	-	33	13	390	25

Figuur 14.20 Bewerkingsstappen voor gat ø40 H7, $R_a = 0{,}8$ µm

Bewerking	Bewerkingstoegift (mm)	Resulterende diameter (mm)	IT	Tolerantieveld (µm)	Ruwheid R_a (µm)
nadraaien	0,2	40	6	15	0,8
nadraaien	1	40,4	8	39	2,5
voordraaien	2	43	10	100	6,3
smeden	-	47	12	250	12,5

Figuur 14.21 Bewerkingsstappen voor as ø40 H6, $R_a = 0{,}8$ µm

gevonden waarden moeten op een verstandige manier worden afgerond naarmate de toleranties groter worden.

Opmerking: Doordat we aannemen dat de ruwheid per stap ongeveer met een factor drie afneemt, wijken de tussenliggende waarden af van de genormaliseerde waarden.

Gatbewerkingen en uitwendige bewerkingen

Gatbewerkingen zijn moeilijker en duurder dan uitwendige bewerkingen. Daarom neemt men in de regel gaten één klasse onnauwkeuriger dan assen. Denk daarbij aan het ISO-passingstelsel (zie hoofdstuk 12).

Voorbeeld 2a:
Het volgende voorbeeld geeft dezelfde berekeningen als voor de cilinder uit figuur 14.19 weer voor een gat-ascombinatie ø40 H7 (zie figuur 14.20). Het gietstuk van een aluminiumlegering, met globale afmetingen van 50-300 mm, is al voorzien van een gat.

Opmerking 1: Afhankelijk van de vereiste plaatsnauwkeurigheid van het gat kan het nodig zijn het opboren te vervangen door kotteren. Daarmee is het mogelijk de hartlijn van het gat op de juiste plaats te krijgen. Met voor- en nakotteren kan men ook zorgen voor een kleine diametertolerantie en een lage ruwheid.
Opmerking 2: Naboren verbetert de kwaliteit van het gat. Het wordt uitgevoerd met een 3- of 4-lippenboor. Opboren vergroot alleen de gatdiameter.

Voorbeeld 2b:
Een as van een aluminiumlegering ø40 × 150 mm is een matrijssmeedstuk, gesmeed met kwaliteit IT 12 (zie figuur 14.21 voor de bewerkingsstappen).

14.4.5 Verdeling van de bewerkingen over de opspanningen

In deze paragraaf richten we ons op de verdeling van de bewerkingen over de opspanningen. We geven algemene richtlijnen en kijken naar vorm- en plaatstoleranties en naar het belang van de laatste bewerking.

Algemene richtlijnen

Als men alle vlakken die van een bewerkingsteken zijn voorzien heeft geanalyseerd, ligt vast welke bewerkingen nodig zijn en welke resultaten bij elke bewerking verkregen moeten worden. Men groepeert vervolgens de bewerkingen die in dezelfde opspanning op dezelfde machine uitgevoerd zullen worden, zoals twee soortgelijke bewerkingen op eenzelfde vlak. Zo is het mogelijk het voor- en nadraaien van een astap, of het boren en opboren van een gat in één opspanning uit te voeren. Niet-soortgelijke bewerkingen, zoals draaien en slijpen, moeten op verschillende machines en dus in verschillende opspanningen plaatsvinden. In hoofdstuk 12 hebben we er al op gewezen dat steeds vaker veelsoortige bewerkingen op dezelfde machine worden uitgevoerd. Op een bewerkingscentrum zijn alle bewerkingen met een roterend gereedschap mogelijk, met uitzondering van slijpen. Met behulp van een roterende spantafel kunnen kastvormige

werkstukken in één opspanning aan vier zijden worden bewerkt, soms zelfs aan vijf zijden. In dit laatste geval zwenkt de hoofdspil van de horizontale naar de verticale stand.

Vorm- en plaatstoleranties

Met speciale symbolen kunnen aan bepaalde vlakken **vormtoleranties** worden toegekend (zie paragraaf 12.6.2). Dit betekent dat er bijzondere eisen gesteld worden aan de nauwkeurigheid van de machine en de zorgvuldigheid van de uitvoering van de laatste bewerking aan dat vlak. In dit boek gaan we hier niet verder op in. Andere symbolen definiëren toleranties van plaats of stand van twee vlakken ten opzichte van elkaar. Dergelijke vlakken bewerkt men het liefst in dezelfde opspanning, tenzij een van de betreffende vlakken al eerder bewerkt werd en in de laatste opspanning als aanslagvlak voor het opspannen kan worden gebruikt. Men weet dan zeker dat de onderlinge plaats en stand ongeveer even nauwkeurig zijn.
Dit is bijvoorbeeld het geval als van een rechthoekig blok de zijvlakken onderling nauwkeurig haaks of juist evenwijdig moeten zijn. Ook boringen zijn in een dergelijk blok met grote plaatsnauwkeurigheid aan te brengen.

De regel is dat paren van vlakken waaraan volgens de tekening hoge eisen op het gebied van de onderlinge plaats en stand worden gesteld, waar mogelijk in dezelfde opspanning bewerkt moeten worden. Wanneer dit onmogelijk is, moet een van de betreffende vlakken als aanslagvlak gebruikt worden.

De laatste bewerking

In vrijwel alle halffabricaten zijn **inwendige spanningen** aanwezig. Deze zijn het gevolg van de krachten die bij de vormgeving optreden en van ongelijkmatige verwarming en afkoeling. Door gloeibehandelingen tracht men deze inwendige spanningen zo veel mogelijk te verminderen (zie hoofdstuk 10). Bij het verwijderen van materiaal wordt het inwendige krachtenevenwicht in het voorwerp verstoord. Het evenwicht wordt weer hersteld door vervormingen. Bovendien kunnen verspanende bewerkingen zelf ook inwendige spanningen veroorzaken, en dus vervormingen. Oorzaken hiervan zijn de optredende snijkrachten en hoge temperaturen, gevolgd door ongelijkmatige afkoeling. Door verspanende bewerkingen kunnen eerder bewerkte vlakken dus hun vorm weer verliezen.
Hieruit volgt de volgende regel: de laatste bewerking aan nauwkeurige vlakken mag pas plaatsvinden nadat alle vereiste voor- en tussenbewerkingen aan het hele werkstuk zijn uitgevoerd.

Deze regel geldt alleen voor vlakken waarvoor uit het oogpunt van kwaliteit drie of meer bewerkingen noodzakelijk zijn. Dat komt dus neer op alle vlakken met ISO-kwaliteit 8 of beter. Kleine gaten (kleiner dan circa ø 20 mm) die in één opspanning geboord en geruimd kunnen worden, zijn hiervan uitgezonderd. Dergelijke kleine gaten zullen namelijk over het algemeen weinig invloed hebben op de nauwkeurigheid van andere vlakken.

In de praktijk wordt vaak een verouderingsprocedure gevolgd voordat men aan de laatste bewerkingen begint. Soms is dat een gloeibehandeling, soms een periode van rust. In ieder geval wordt de opspanning gelost en krijgt het werkstuk wat tijd om af te koelen voordat het opnieuw wordt geklemd.

14.5 Werkwijze voor het vaststellen van het bewerkingsplan

We vatten hier de belangrijkste informatie uit de paragrafen 14.3 en14.4 nog eens samen. We hebben gekozen voor een receptmatige benadering, omdat deze het meeste houvast biedt. Toch leidt deze aanpak niet tot een eenduidig resultaat. Er kunnen meerdere goede oplossingen zijn. In de praktijk kan het nodig zijn van de gestelde regels af te wijken.

Voorafgaand aan het vaststellen van het bewerkingsplan is het verstandig de ingeschreven maten en toleranties op de tekening aan een kritisch onderzoek te onderwerpen. Vaak zal blijken dat maten zijn ingeschreven op een wijze die tijdens de productie problemen veroorzaakt. Onnodig nauwe toleranties kunnen leiden tot extra bewerkingen of zelfs extra opspanningen. Overleg tussen werkvoorbereider en ontwerper kan veel kosten besparen.

Recept voor het opstellen van een bewerkingsplan:
1. Het is handig om alle te bewerken vlakken op de tekening aan te geven met een (letter)code.
2. Stel de kandidaat-referentievlakken vast.
3. Bepaal de referentievlakken.

Bewerkingsplan							
Naam onderdeel:					Datum:	Bladnr.:	
Behorende bij tekening:					Gemaakt door:		
Onderdeelnummer:					Aantal:	Materiaal:	
Hoofdafmeting uitgangsmateriaal:							
Bewerkingsvolgorde							
Volg-nummer	Vlak	Bewerking	Bewerkings-toeslag	Wijziging machine en/of opspanning	Verspanend gereedschap	Instel-grootheden	Opmerkingen

Figuur 14.22 Werkmethodeformulier

4. Ga voor alle te bewerken vlakken na welke eindbewerkingen nodig of mogelijk zijn om de gewenste maatnauwkeurigheid en ruwheid te verkrijgen.
5. Ga na welke bewerkingen bij voorkeur in één opspanning bewerkt moeten worden, in verband met vorm- of plaatstoleranties.
6. Maak een keuze voor de eerste en eventuele volgende basisconfiguratie(s).
7. Maak een voorlopige keuze voor de opspanningen met de bijbehorende aanslagvlakken.
8. Stel per vlak alle voor- en tussenbewerkingen vast.
9. Aan de hand van de punten 4 en 7 blijkt welke gereedschapswerktuigen en gereedschappen nodig zijn. Indien er een aantal verschillende mogelijkheden is om het gestelde doel te bereiken, moet men ernaar streven het aantal gereedschapswerktuigen te beperken.
10. Zoek combinaties van voor- en tussenbewerkingen die in één opspanning kunnen worden uitgevoerd. Beperk het aantal opspanningen zo veel mogelijk.
11. Stel de eerste opspanning vast en schets die. Kies als de eerst te bewerken vlakken (indien mogelijk) de referentievlakken. Bedenk daarbij dat bij deze eerste groep bewerkingen alle vlakken, dus ook alle aanslagvlakken, vormonnauwkeurig zijn en dat de oplegging daarom statisch bepaald moet zijn.
12. Bepaal de volgorde van de vervolgopspanningen en schets deze.
13. Controleer per opspanning of telkens de referentievlakken als basis worden gebruikt en of het werkstuk steeds volledig gepositioneerd en goed geklemd is. Controleer of in alle bewerkingen is voorzien, en of hun volgorde juist is. Ga zo nodig terug naar punt 6.
14. Geef voor alle voor-, tussen- en eindbewerkingen de grootte van de bewerkingstoeslagen aan.
15. Stel per opspanning de microbewerkingsvolgorde vast, dat wil zeggen de volgorde waarin de diverse vlakken binnen één opspanning bewerkt moeten worden. Gewoonlijk streeft men ernaar de zwaarste bewerkingen het eerste uit te voeren. Zorg er ook voor dat het aantal gereedschapswisselingen zo veel mogelijk wordt beperkt. Laat bijvoorbeeld eerst alle gaten boren en pas daarna alle gaten tappen, in plaats van n maal boren en tappen.
16. Specificeer per bewerking de gereedschappen en de instelgrootheden.
17. Controleer de hele bewerkingsmethode op de volgende punten:

a. Voor alle te bewerken vlakken zijn alle benodigde bewerkingen aangegeven.
b. Voor elke bewerking is duidelijk:
   - in welke opspanning deze moet worden uitgevoerd;
   - welk gereedschap gebruikt moet worden;
   - dat het gereedschap het te bewerken vlak kan benaderen.
c. De volgorde van de opspanningen en van de bewerkingen is opgebouwd volgens de richtlijnen.
d. De opspanningen verzekeren een eenduidige positionering van het werkstuk en ondersteunen het werkstuk zo dat er geen ontoelaatbare vervormingen door de klemkrachten of bewerkingskrachten kunnen optreden.

18. Vul het **werkmethodeformulier** (zie figuur 14.22) in en werk de opspantekeningen uit.

14.6 Computerondersteunde werkvoorbereiding

Bewerkingsplannen moeten op elk tijdstip afgestemd zijn op de werkelijke situatie in het bedrijf, en dus steeds aangepast worden aan de machines en gereedschappen die op dat moment beschikbaar zijn. Kostbare machines en systemen mogen niet staan wachten op gegevens vanuit de werkvoorbereiding. Deze machines hebben een tot in het kleinste detail uitgewerkte en geprogrammeerde werkvoorbereiding nodig.

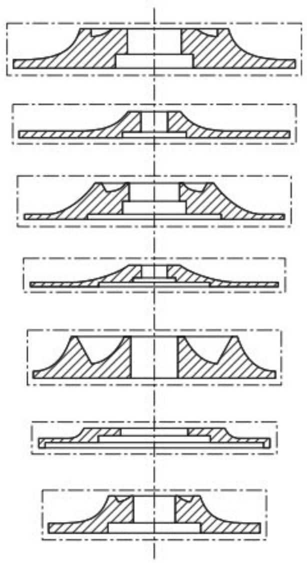
Flexibele productieapparatuur biedt de mogelijkheid om bewerkingsprocessen snel aan te passen aan veranderende omstandigheden (zie hoofdstuk 13). Dit houdt in dat de werkvoorbereiding evenveel flexibiliteit moet opbrengen en bij veranderingen zeer snel aan de vraag naar aangepaste informatie moet kunnen voldoen. Als gevolg van de toegenomen automatisering is de behoefte om de werkvoorbereiding te automatiseren eveneens toegenomen. Automatisering van de werkvoorbereiding biedt bovendien de mogelijkheid om alternatieve fabricagemethoden met elkaar te vergelijken en de beste oplossing te zoeken, ook in de kleinserie- en enkelstuksfabricage. In termen van computerondersteuning spreekt men van **computer-aided process planning (CAPP)**. We bespreken in deze paragraaf twee verschillende methoden voor computerondersteuning in de werkvoorbereiding en gaan in op de integratie van computerondersteund ontwerpen, werkvoorbereiden en produceren.

Methoden voor de computerondersteuning in de werkvoorbereiding

Er zijn twee verschillende methoden om een nieuw bewerkingsplan te maken:
- de varianttype werkvoorbereiding;
- de generatieve werkvoorbereiding.

Werkvoorbereidingssystemen van het **variant-type** of **'retrieval'-type** zijn gebaseerd op het aanpassen van al bestaande bewerkingsplannen, waarbij groepentechnologie wordt gebruikt. Groepentechnologie maakt gebruik van het feit dat veel bewerkingsproblemen op elkaar lijken en dat door het groeperen van gelijksoortige producten één enkele vervaardiging gevonden kan worden die, al dan niet met beperkte aanpassingen, voor een gehele groep (productfamilie) kan worden gebruikt. Dit bespaart uiteraard tijd en moeite. Zie ook paragraaf 15.3.3. De werkwijze hangt af van de wijze van groeperen. Bij een overzichtelijk productenpakket kan een eenvoudige indeling in productfamilies zoals assen, schijven, rechte tandwielen en kastvormige producten voldoende zijn. Wil men vanuit een grote verscheidenheid aan producten komen tot een indeling in gelijksoortige werkstukken, dan kan men een **classificatiesysteem** toepassen. Met behulp van een classificatiesysteem wordt aan ieder werkstuk een classificatienummer toegekend. Producten met hetzelfde classificatienummer, of behorende tot een beperkte groep van classificatienummers, vormen een productfamilie. Alle leden van een productfamilie worden in principe op dezelfde wijze vervaardigd.

Voor elke familie wordt één basisbewerkingsplan gemaakt. Omdat dit plan vele malen wordt toegepast, kan het tot in detail worden uitgewerkt en uitgebreid worden getest. Wanneer de werkvoorbereider een bewerkingsplan voor een lid van de betreffende familie moet maken, roept hij het basisplan op, eventueel met behulp van het classificatienummer. Vervolgens maakt hij dit plan geschikt voor het werkstuk met een minimum aan aanpassingen. Hij kan bijvoorbeeld een andere boormaat met aangepaste instelwaarden kiezen. Deze werkvoorbereidingsmethode is vooral geschikt voor werkstukpakketten die bestaan uit een beperkt aantal families met sterke overeenkomsten. In figuur



Figuur 14.23 Familie van in hoge mate overeenkomstige producten: Schijven bestemd voor de fabricage van centrifugaalcompressoren

14.23 zie je een voorbeeld van een dergelijke familie. Deze methode is niet geschikt om verregaand te automatiseren.

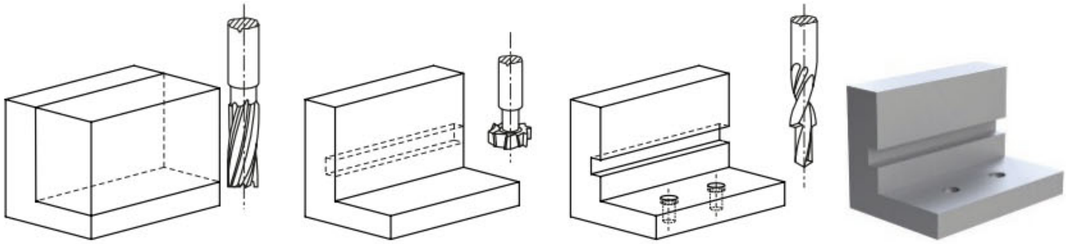
Generatieve werkvoorbereidingssystemen gebruiken beslissingsregels en wiskundige modellen om de selectieprocessen uit te voeren. Voor elk afzonderlijk te bewerken product wordt een nieuw bewerkingsplan gegenereerd. Het grote voordeel van deze methode is het feit dat er bewerkingsplannen ontwikkeld kunnen worden met betrekkelijk weinig menselijke tussenkomst. Bovendien kunnen met een generatieve benadering alternatieve oplossingen met elkaar vergeleken worden en kunnen procescondities geoptimaliseerd worden. Vanzelfsprekend is een computer hierbij onmisbaar. Generatieve systemen zijn tot nu toe vooral ontwikkeld voor verspanende bewerkingen.

Het uitgangspunt van een generatief systeem is de herkenning van **vormelementen** die frequent in producten voorkomen. Deze vormelementen worden vervolgens gerelateerd aan bewerkingsmethoden. Als invoer geldt een driedimensionaal computermodel van een product. Een vormelement is een kenmerkend deel van het werkstuk dat verkregen wordt door materiaal te verwijderen. De afmetingen van de vorm worden parametrisch beschreven, en andere gegevens die voor de bewerking van belang zijn worden toegevoegd. Het vormelement 'gat' is bijvoorbeeld te beschrijven met de parametrische aanduiding van diameter, lengte en bodemgeometrie, met de toevoeging van gegevens over de maat-, plaats- en vormtoleranties, oppervlaktekwaliteit en materiaalsoort. Al deze gegevens horen bij één specifieke bewerking, of bij een reeks van met elkaar verband houdende bewerkingen. In het voorbeeld 'gat' kan deze reeks bestaan uit centerboren, voorboren, naboren en ruimen.
Veelvoorkomende vormelementen zijn gleuven, gaten en kamers (zie figuur 14.24). De selectie van machinale bewerkingen voor het aanbrengen van bijvoorbeeld een spiegleuf of een kamer vereist gegevens over die bepaalde gleuf of kamer en zijn relatie met de rest van het werkstuk. Vormelementen worden ook gebruikt voor het opspannen en voor meetdoeleinden.

Voor een in omvang beperkte verzameling vormelementen kan een generatief werkvoorbereidingssysteem voor een groot deel automatisch het bewerkingsplan genereren, en zelfs het bijbehorende werkstukprogramma met de werkinstructies.

Integratie van computerondersteund ontwerpen, werkvoorbereiden en produceren

Computer-aided manufacturing (CAM) betreft de toepassing van computerbesturing bij de uitvoering van productieprocessen en operaties op de werk-



Figuur 14.24 Werkstuk gedefinieerd met drie vormelementen

vloer die betrekking hebben op het gebruik van numeriek bestuurde werktuigen en computergestuurde apparatuur voor ondersteunende processen zoals transport, opslag en kwaliteitscontroles. De voornaamste doelen die bij de toepassing van CAM worden nagestreefd zijn:
- snelle bewerkingsprocessen en ondersteunende processen in de werkplaatsen en een snelle doorvoer van producten;
- een hoge bewerkingsnauwkeurigheid en kwaliteitsbeheersing;
- een hoge betrouwbaarheid van de processen en het voorkomen van stilstand en uitval van productiemiddelen.

Als link tussen CAD en CAM vertegenwoordigt **CAPP (computer-aided process planning)** de planning van werkorders en materiaalstromen, en de uitvoering van de werkvoorbereiding voor de elkaar opvolgende bewerkingen die de onderdelen moeten ondergaan op verschillende werktuigen. Dit betreft voor ieder te maken onderdeel:
- de keuze van elkaar opvolgende bewerkingen;
- de keuze van opspanningen en gereedschappen;
- de routeplanning van de onderdelen langs de verschillende werktuigen;
- het aanmaken van de bewerkingsprogramma's voor de werktuigen en eventuele andere apparatuur op de werkplaatsvloer.

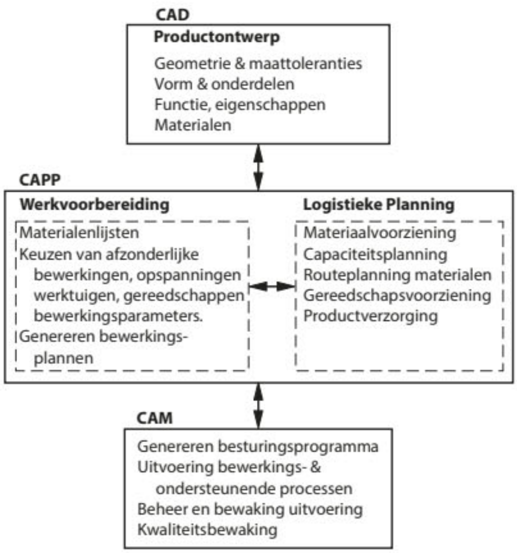
De geometrische productmodellen CAD dienen als informatie-invoer betreffende:
- benodigde materialen,
- vorm, afmetingen en maattoleranties,
- kwaliteitscontrole.

CAPP dient om de uitvoering van de werkvoorbereiding voorafgaand aan de feitelijke productieactiviteiten op de werkvloer te verbeteren en korter te laten duren. Zoals we hiervoor hebben aangegeven, kunnen er twee verschillende vormen van deze computerondersteuning worden onderscheiden, de generatieve methode en de op groepentechnologie gebaseerde variantmethode waarbij men uitgaat van reeds bestaande bewerkingsplannen.

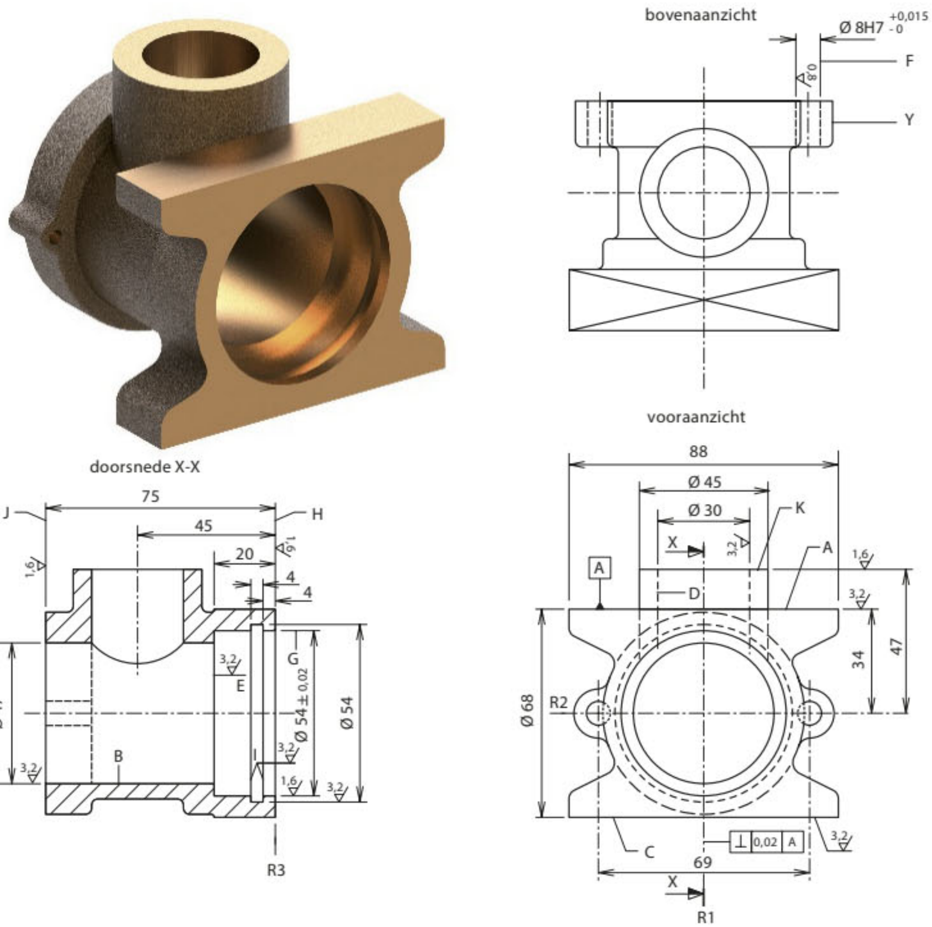
Het generatieve type kiest in hoge mate automatisch de bewerkingsmethoden, opspanmethoden, opspangereedschappen, bewerkingsvolgorden en bewerkingsgereedschappen, en genereert ten slotte automatisch de bewerkingsprogramma's voor de gekozen bewerkingsmachines. Het gaat dan om gereedschapsbanen, gereedschapswisselingen, opspanningen en machineafhankelijke gebruiksparameters en instelparameters. De variantmethode is gebaseerd op keuzen die betrekking hebben op productvarianten waarvan programma's beschikbaar zijn.

Capaciteitsplanning (in verband met de beschikbaarheid van gereedschapswerktuigen), het opstellen van materiaallijsten en het plannen van materiaalstromen langs de verschillende bewerkings- en controlestations, vallen onder de logistieke taak van CAPP, samen met de materiaalbehoefteplanning gericht op de planning van doorstroomtijd en levertijd.
De integratie van informatiestromen op werkplaatsniveau is onmisbaar bij het opzetten van flexibele fabricagesystemen (zie paragraaf 13.6.3). Het informatiesysteem is verbonden met de afzonderlijke CNC-productiemachines, meetapparatuur, interne transportsystemen en hanteersystemen, zoals robots. Het doel van flexibiliteit is onder meer het verkorten van machine-insteltijden, waarmee de economische grootte van de fabricageseries drastisch gereduceerd kan worden.

In de combinatie CAD/CAPP/CAM vertegenwoordigt CAPP verreweg het meest complexe samenstel van onderling afhankelijke en kostengevoelige functies in productiebedrijven, in het bijzonder



Figuur 14.25 Overzicht van de belangrijkste functies en hun samenhang in CAD, CAPP en CAM



Figuur 14.26 Productvoorbeeld: T-stuk

waar het serieproductie betreft. Figuur 14.25 geeft een overzicht van de belangrijkste functies van CAD, CAPP en CAM.

14.7 Toepassingsvoorbeeld: het vervaardigen van een gegoten product

Het product in figuur 14.26 wordt van messing vervaardigd door gieten, gevolgd door een verspanende bewerking. De totaalserie bedraagt 400 stuks, voor het gieten verdeeld over 4 fabricageseries. Het verspanend bewerken gebeurt in fabricageseries van 25 stuks. Jij bent gevraagd de vorm- en gietmethode en het bewerkingsplan voor de verspanende bewerking op te stellen.

14.7.1 De vorm- en gietmethode

Voor de keuze van het gietproces wordt de tabel uit figuur 3.35 geraadpleegd.
Gezien het werkstukmateriaal, messing met een giettemperatuur van circa 1000 °C, komen alle gietprocessen in aanmerking, behalve spuitgieten. Schaalvormen en coquillegieten vallen af wegens de beperkte seriegrootte. Gezien de series van 100 stuks komt een vormautomaat in het geheel niet in aanmerking. De omsteltijd van de machine is hier bepalend. Vormgeving en nauwkeurigheid stellen geen bijzondere eisen. Hiermee vervalt de dure verloren-modelmethode.

Conclusie: Kies voor gieten in kleigebonden zand en vormen met een schok-pers-wentelvormmachine (zie paragraaf 3.5.5).

Het deelvlak van de gietvorm

Het vlak van doorsnede X-X is het enig mogelijke deelvlak waarbij geen ondersnijding optreedt. Het is nodig de vlakken loodrecht op vlak X-X van een lossingshoek te voorzien.

Kern

De inwendige holte wordt gevormd met behulp van een kern. Het model moet in dit geval worden uitgevoerd met drie kernprenten.

Gietloop en opkomers

Het gietsysteem heeft twee aansnijdingen, in verband met de aanwezige kern. Het gietstuk heeft drie 'hoogste punten', maar gezien de beperkte afmetingen van het gietstuk en de gasdoorlaatbaarheid van het vormzand is één opkomer voldoende. Deze wordt op punt Y geplaatst (zie figuur 14.26). Vanwege de materiaaldikte zal dit punt het laatste stollen.
De complete gietvorm hebben we afgebeeld in figuur 14.27.

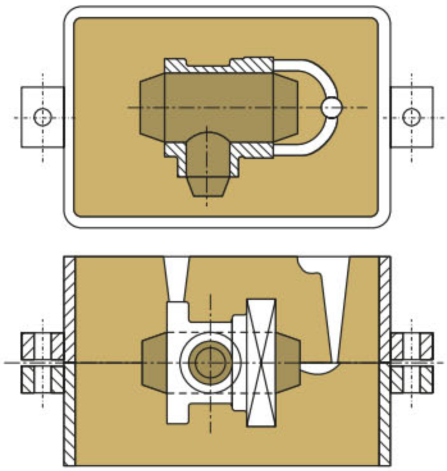
14.7.2 De macrowerkmethode bij het verspanen

Het product uit figuur 14.26 wordt vervaardigd in 16 fabricageseries van 25 stuks. Dit betekent dat bewerken op een NC-machine waarschijnlijk de voorkeur verdient.
Bepalend voor de bewerkingsvolgorde zijn de vormtolerantie van gat D ten opzichte van vlak A en de tolerantie op vlak G. De tolerantie van ± 0,02 mm komt overeen met kwaliteitsklasse 7. Deze moet met een voor-, tussen- en nabewerking worden verkregen. De nabewerking dient plaats te vinden na alle voor- en tussenbewerkingen, behalve die voor de betrekkelijk kleine gaten ø 8 h7 en de groef I. Dit vereist dus extra bewerkingen en, afhankelijk van de bewerkingsmethode, zelfs extra opspanningen. Het is dus zaak om na te gaan of de gevraagde tolerantie echt noodzakelijk is!
Er zijn verschillende bewerkingsmethoden mogelijk. In de praktijk wordt de keuze meestal bepaald door het beschikbare machinepark. We geven hier drie mogelijke oplossingen. Van een van deze oplossingen werken we ook de microwerkmethode uit.

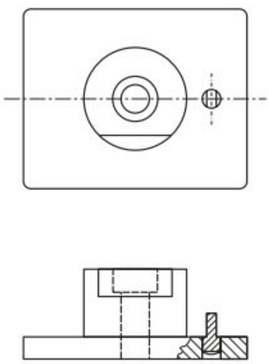
Oplossing 1

Het bewerken op conventionele machines. Een mogelijke bewerkingsvolgorde hierbij is draaien (1), frezen en boren (2), frezen (3), kotteren (4) en nakotteren (5a) of nadraaien (5b). Voor deze methode is een eenvoudig stelstuk nodig (zie figuur 14.28).

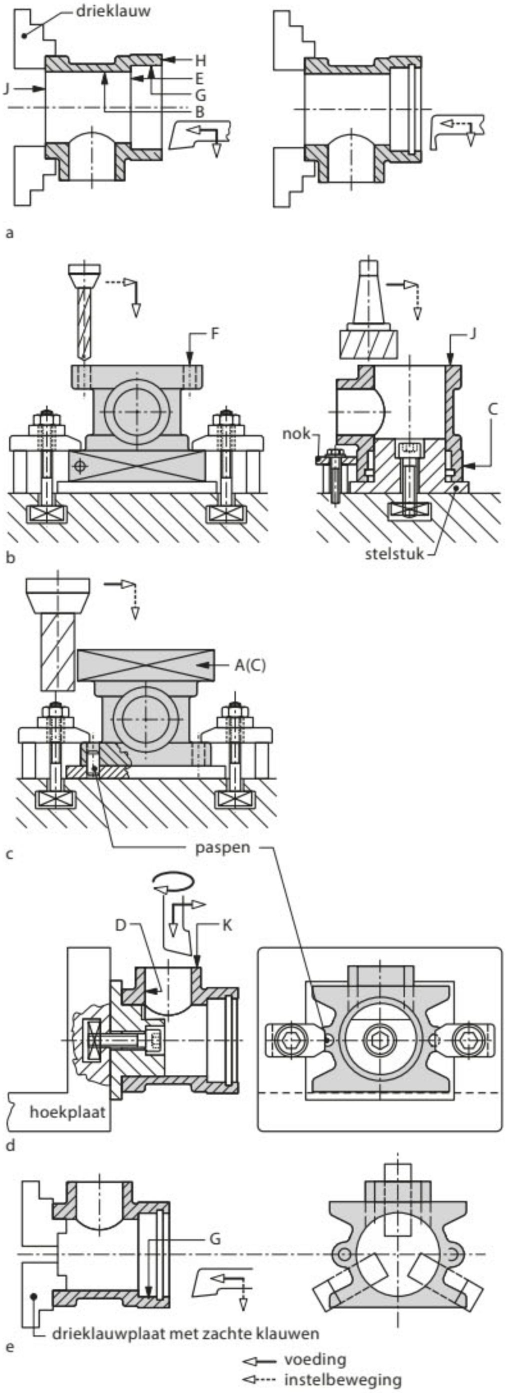
1. Spannen op een draaimachine in drieklauw aan de zijde van vlak J. Als referentievlakken hebben we gat B (R1 en R2) en vlak H (R3) gekozen. Vlakdraaien vlak H. Uitdraaien vlakken B, G en E. Uitdraaien I (zie figuur 14.29a).
2. Spannen met behulp van het stelstuk volgens figuur 14.28 op een verticale freesmachine (zie figuur 14.29b). Aanslagvlak H, positioneren op vlak B. Vlak C uitlijnen met de voedingsrichting



Figuur 14.27 Gietvorm voor het productvoorbeeld uit figuur 14.26



Figuur 14.28 Stelstuk bij oplossing 1



Figuur 14.29 Macrowerkmethode bij oplossing 1

van de freesmachine, meten met behulp van de spansleuven in de tafel. Na het uitlijnen van het eerste werkstuk van een serie de nok afstellen. De positie van de spil bepalen ten opzichte van het stelstuk. Vlakfrezen vlak J. Bewerken gaten F ten opzichte van Rl en R2.

3. Werkstuk omkeren, aanslagvlak J, positioneren met vlak B. Rotatie om de hartlijn van vlak B blokkeren met paspen. Frezen van de vlakken C en A (zie figuur 14.29c).
4. Hetzelfde stelstuk op hoekplaat gebruiken. Kotteren van de vlakken D en K (zie figuur 14.29d).

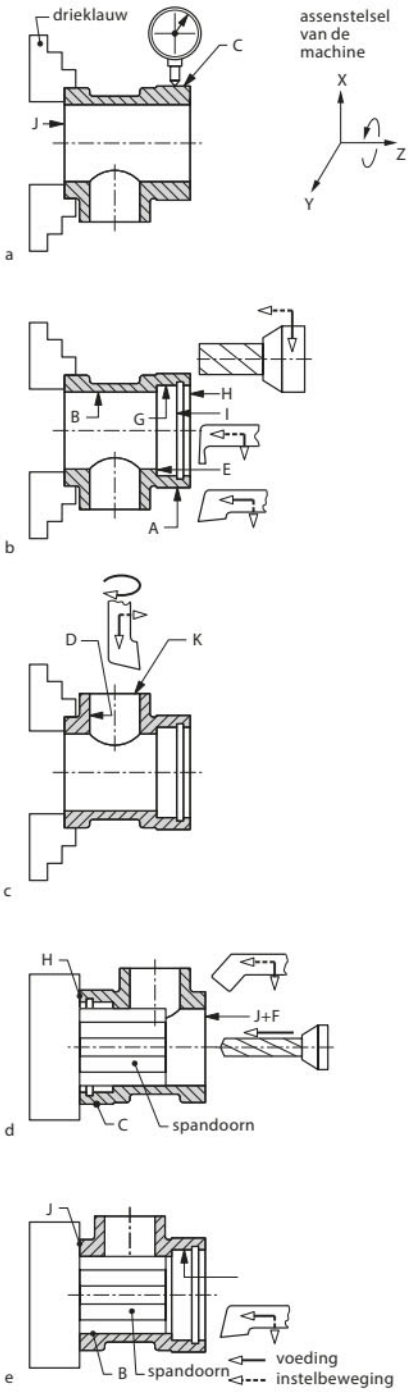
5 a. Spannen op freesmachine op dezelfde wijze als in stap 3, uitlijnprocedure is niet nodig. Kotteren G naar kwaliteit 7.

5 b. (Alternatief voor 5a.) Spannen op draaimachine met zachte, op ø 47 mm afgedraaide, klauwen op B, met J als aanslagvlak. Nadraaien G naar kwaliteit 7 (zie figuur 14.29e).

Oplossing 2

Het bewerken op een draaicentrum in drie opspanningen.

1. Spannen in drieklauw aan de zijde van vlak J. Referentievlakken B (R1 en R2) en H (R3). Met behulp van een meetklok, uitgaande van de dwarsslede, de C-as van de machine roteren zodat vlak C horizontaal staat. Dit wordt de 0-positie van de C-as. Frezen vlak C, C-as 180° roteren, frezen vlak A (zie figuur 14.30a en b).
2. Vlakdraaien vlak H. Uitdraaien (in twee stappen) van de vlakken B, G en E. Uitdraaien groef I (zie figuur 14.30b).
3. C-as roteren in 90°-positie. Kotteren D (ten opzichte van R3 en Rl) en K (ten opzichte van R2) met roterend gereedschap in revolverkop (zie figuur 14.30c).
4. Na de stappen 1, 2 en 3 voor de gehele fabricageserie de drieklauw vervangen door een spandoorn met ø 47 mm. Spannen op vlak B, vlak H als aanslagvlak gebruiken. Vlak C opnieuw horizontaal stellen en de positie van de C-as opnieuw vaststellen. Vlakdraaien vlak J, bewerken van de gaten E (zie figuur 14.30d).
5. Product omkeren. Spannen op vlak B met J als aanslagvlak. Nadraaien G op kwaliteit 7 (zie figuur 14.30e).



Figuur 14.30 Macrowerkmethode bij oplossing 2

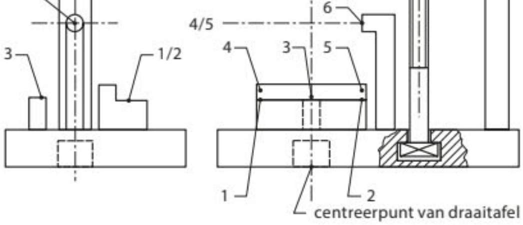
Oplossing 3

Het bewerken in één opspanning met een horizontaal bewerkingscentrum uitgerust met een draaitafel. Het product wordt gespannen met een stelstuk volgens figuur 14.31. Let hierbij op de oplegpunten 1-6 volgens de 3-2-1-methode. De vormtolerantie wordt gegarandeerd door de nauwkeurigheid van de draaitafel. Bij het bepalen van de volgorde hebben we getracht het aantal gereedschapswisselingen zo veel mogelijk te beperken. Een mogelijke macrobewerkingsvolgorde is dan (zie figuur 14.32):

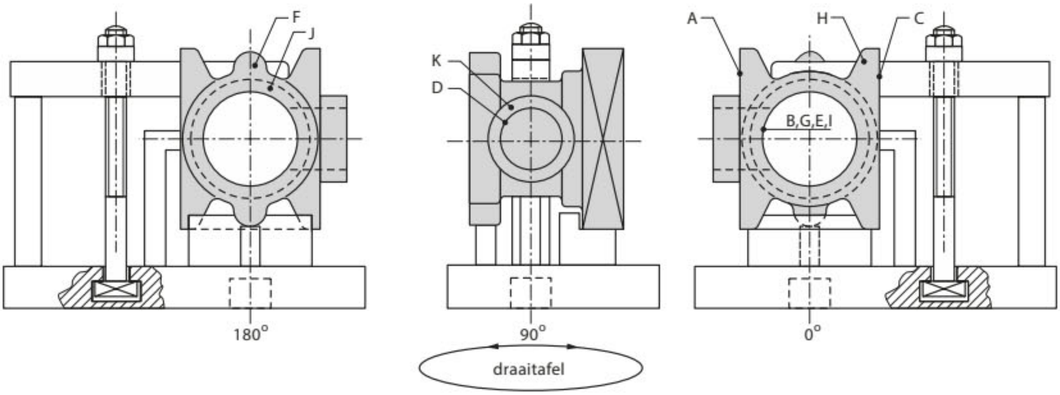
1. Vlakfrezen vlak H, 90° roteren, vlakfrezen vlak K, 90° roteren, vlakfrezen vlak J.
2. Frezen vlak C en vlak A.
3. Kotteren vlak B, G en E in twee stappen. In verband met het bewerken van de vlakken E en I (stap 4), is een kotterkop met een radiale voedingsbeweging nodig. Roteren −90°, kotteren vlak D.
4. Roteren 90°, nakotteren vlak G. Kotteren groef I.
5. Roteren 180°, bewerken gaten F. Hierbij wordt slechts weinig materiaal afgenomen. Daarom is het toelaatbaar deze bewerking uit te voeren na het nabewerken van vlak G. Dit bespaart een gereedschapswisseling.

Vergelijking van de verschillende oplossingen

Oplossing 1 is uitvoerbaar in eenvoudig uitgeruste werkplaatsen. Het toegepaste productgebonden stelstuk is betrekkelijk eenvoudig en goedkoop. De nadelen van conventionele machines komen ook duidelijk naar voren. Er zijn betrekkelijk veel opspanningen nodig en het totale bewerkingsproces vraagt om twee verschillende machines, waarbij de draaimachine twee keer wordt benut (bij een keuze voor stap 5b). Tussendoor zijn 3 opspanningen op de freesmachine nodig. Dit zorgt



Figuur 14.31 Stelstuk bij oplossing 3



Figuur 14.32 Macrowerkmethode bij oplossing 3

voor een langere doorlooptijd. Ook de steltijd is aanmerkelijk langer. De nauwkeurigheid van het product is afhankelijk van het vakmanschap van de machinebedieners.

Oplossing 2 vraagt om een draaicentrum. De gegeven oplossing vraagt niet om een productgebonden stelstuk. Een nadeel is echter de uitlijnprocedure, die bij elk werkstuk terugkeert. Bovendien moet na de eerste opspanning van spanmiddel worden gewisseld. Dit verlengt de steltijd. De werkstukken moeten tweemaal worden opgenomen en weggelegd.

Oplossing 3 vraagt om een horizontaal bewerkingscentrum en een betrekkelijk kostbaar stelstuk. Daarna is de hele bewerking in één opspanning uit te voeren.

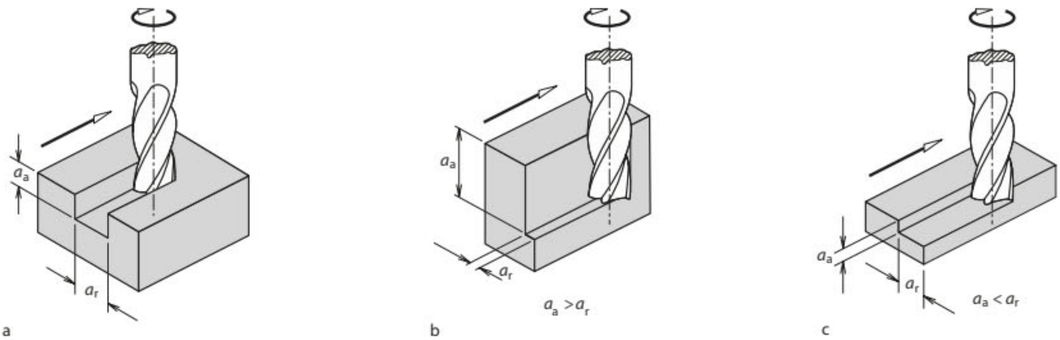
De uiteindelijke keuze wordt bij deze seriegrootte in de eerste plaats bepaald door de beschikbare uitrusting. Wanneer er meerdere alternatieven beschikbaar zijn, moet een kostenvergelijking uitkomst brengen. De betrouwbaarheid en de doorlooptijd moeten echter ook in de overwegingen worden meegenomen, evenals de bezetting van de beschikbare machines. Onder **betrouwbaarheid** verstaat men de zekerheid dat een gevolgde fabricagemethode tot het gewenste resultaat leidt. De **doorlooptijd** is de totale tijd dat een werkstuk in een werkplaats verblijft. Het is dus de som van alle bewerkingstijden, transporttijden en wachttijden. De **bezettingsgraad** wordt aangegeven in procenten. Een hoge bezettingsgraad levert lange wachttijden op, en dus een lange doorlooptijd.

14.7.3 De microwerkmethode bij het verspanen

De microwerkmethode geeft per opspanning aan welke bewerkingsstappen nodig zijn en welke gereedschappen moeten worden toegepast. Het is nu mogelijk de noodzakelijke bewerkingstoegiften vast te stellen. Deze zijn bepalend voor de afmetingen van het onbewerkte gietstuk. In dit voorbeeld werken we aan de hand van figuur 14.32 de microwerkmethode voor oplossing 3 uit.

De keuze van het juiste type frees

Frezen wordt behandeld in paragraaf 5.9. De meest gangbare typen frezen zijn afgebeeld in figuur 5.83. Door de toepassing van hardmetalen wisselplaten en de vrijwel constante snededikte (zie figuur 5.76), is kopfrezen met een meskopfrees de meest efficiënte freesmethode voor het bewerken van platte vlakken. Wanneer het te bewerken vlak wordt begrensd door een ander vlak, loodrecht op het eerste, moet een meskopfrees met een snijkantshoek van 90° worden toegepast (zie figuur 5.84).
De mantelfrezen uit figuur 5.83a, b en c zijn minder efficiënt en worden alleen toegepast wanneer dit onvermijdelijk is. Dit is vooral het geval bij het frezen van profielen. Wanneer er geen ruimte is voor een meskopfrees, bijvoorbeeld bij het uitfrezen van een kamer, wordt de vingerfrees (zie figuur 5.83f) toegepast. Figuur 14.33 geeft drie verschillende toepassingsmogelijkheden van vingerfrezen. Wanneer het nodig is om te beginnen met een axiale voedingsbeweging (boorbewerking), moet men kiezen voor de spiebaanfrees (zie figuur 5.81e). De spiebaanfrees heeft echter maar twee tanden en laat daardoor een lagere voedingssnel-



Figuur 14.33 Bewerken met een vingerfrees: groeffrezen (a), contourfrezen (b) en kopfrezen (c)

heid toe. Deze frees is dus minder efficiënt dan de vingerfrees.

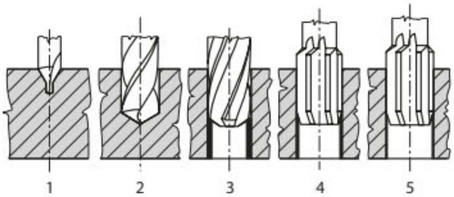
Stap 1:
Vlakfrezen van de kopse vlakken J, K en H. De gevraagde R_a-waarde bedraagt steeds 1,6 µm. Uit figuur 14.17 is af te lezen dat deze ruwheid met nafrezen te bereiken is. Uitgaande van de R_a van zandgietwerk van 25 µm en de vuistregel van verlaging van de R_a per bewerking met een factor 3, zijn hiervoor twee stappen nodig. We kiezen voor voor- en nafrezen met het kopvlak van een mantelkopfrees. De bewerkingstoegift bedraagt volgens figuur 14.18 voor het nafrezen 1 mm, voor het voorfrezen 2 mm. De totale bewerkingstoegift bedraagt dus 3 mm.

Stap 2:
Frezen van de vlakken C en A met het mantelvlak van dezelfde mantelkopfrees. Wegens de grotere toegestane ruwheid en maattolerantie (± 0,5 mm) is hier voorfrezen voldoende.

Stap 3:
Kotteren van de vlakken B, G en E met een blindboorbeitel vanwege vlak E (zie figuur 5.38). De bewerkingstoegift bedraagt weer 3 mm, dus 6 mm op de diameter. Ter plaatse van vlak G moet deze meer bedragen door de vorm van de kern (zie figuur 14.28). Hierbij is al rekening gehouden met de extra toegift van 2 × 0,5 mm die voor het nabewerken van vlak G nodig is.
Kotteren vlak D, komt overeen met vlak B.

Stap 4:
Nakotteren vlak G, materiaaltoegift 2 × 0,5 mm.

Stap 5:
Kotteren groef I. Gebruik hiervoor de kamerbeitel (zie figuur 5.38). Deze beitel heeft een breedte van



1	centerboren	
2	voorboren met spiraalboor	d_{nom} - 2mm
3	naboren met drielippenboor	d_{nom} - 0,4mm
4	voorruimen	d_{nom} - 0,1 à 0,2 mm
5	naruimen (op maat ruimen)	d_{nom}

Figuur 14.34 Bewerkingsstappen voor gaten ø8 H7

3 mm, zodat bij het nadraaien de groef aan beide zijden 0,5 mm breder gemaakt kan worden.

Stap 6:
De tolerantie op de positie van de gaten F (maat '69,0') maakt centerboren noodzakelijk. Wegens de kwaliteit H7 is voorboren ø 6 mm, naboren ø 7,4 mm, voorruimen ø 7,8 mm en naruimen ø 8 H7 vereist (zie figuur 14.34).
Opmerking: de eerste ruimerbewerking kan worden vervangen door een tweede naboorbewerking.

14.8 Toepassingsvoorbeeld: het vervaardigen van een plaatwerkproduct

In figuur 14.35a hebben we een typisch plaatwerkproduct weergegeven zoals dat in de kleinseriefabricage (in series tot enkele honderden stuks) voorkomt. Aan de hand van dit voorbeeld zullen we de opeenvolgende stappen in de werkvoorbereiding toelichten. We zijn uitgegaan van een seriegrootte van 16 stuks en roestvast staalplaat van 1,5 mm dik. Er worden gladde randen vereist. We bespreken in deze paragraaf het genereren van de uitslag, vervol-

gens het vervaardigen van de uitslag en tenslotte het buigen van de uitslag tot eindproduct.

14.8.1 Het genereren van de uitslag

In veel gevallen heeft het productmodel (de werkstuktekening of het CAD-model) alleen betrekking op de gebogen toestand van het product. Uit dit model moet de vlakke toestand die hieraan voorafgaat, de **uitslag** van het product, worden afgeleid. Sommige CAD-systemen voeren dit automatisch uit. In andere gevallen moet de ontwerper het zelf doen. Soms wordt dit aan de werkvoorbereider overgelaten. De uitslag van het voorbeeldproduct hebben we weergegeven in figuur 14.35b.
Ook wanneer de uitslag al getekend is, kan het nodig zijn kleine correcties in de afmetingen ervan door te voeren. Dit hangt af van de keuze van het buigproces (zie paragraaf 14.8.3). Ook de nauwkeurigheid van de gekozen scheidende bewerking kan invloed hebben op de keuze van het buigproces.

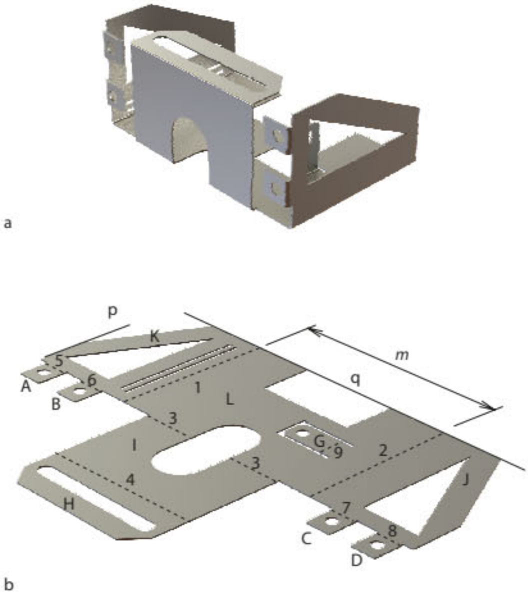
14.8.2 Het vervaardigen van de uitslag

Keuze van de scheidende bewerking

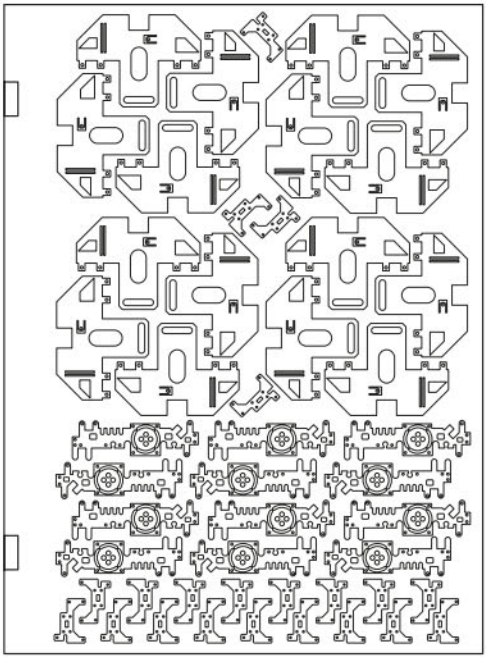
De scheidende bewerkingen die in aanmerking komen hebben we behandeld in de paragrafen 7.1 en 7.3. Vanwege de kleine seriegrootte komt ponsen met een productgebonden stempel niet in aanmerking. De deelserie beslaat maar een beperkt plaatoppervlak. Daarom worden producten uit verschillende series samengevoegd in een plaat van standaardafmetingen (**nesten**, zie figuur 14.36). Dit verkort de stuktijden en levert vaak een gunstiger materiaalgebruik op.

Geschikte processen om willekeurige contouren uit te snijden zonder productgebonden gereedschap zijn:
- brandsnijden;
- plasmasnijden;
- ponsen/knabbelen;
- lasersnijden;
- draadvonken;
- waterstraalsnijden.

Brandsnijden en plasmasnijden vallen af vanwege de materiaalsoort en de eisen die worden gesteld aan de rand. Draadvonken en waterstraalsnijden vallen af wegens de lage bewerkingssnelheid. Daarnaast wordt draadvonken vooral toegepast bij grote plaatdikten en enkelstuksproductie. De keuze gaat dus tussen ponsen/knabbelen en lasersnijden.



Figuur 14.35 Productvoorbeeld van plaatwerk (a) en bijbehorende uitslag (b)



Figuur 14.36 Voorbeeld van een plaat met geneste werkstukken

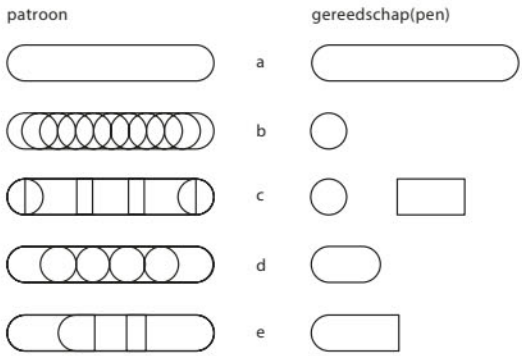
Een belangrijk criterium is de vorm van de producten. Figuur 7.17 toont hoe een willekeurig product met behulp van één rechthoekig ponsgereedschap en één knabbelstempel bewerkt wordt. Wanneer de contouren van de verzameling producten (nest) veel verschillende gereedschappen vereisen, is de capaciteit van het gereedschapsmagazijn van de machine vaak te klein. Bovendien zijn er dan veel gereedschapswisselingen nodig. Het is belangrijk om zo veel mogelijk uit te gaan van een beperkt aantal standaardgereedschappen. Wanneer dit niet mogelijk is, vormt lasersnijden een goed alternatief. Lasersnijden wordt vooral toegepast in kleinere series (bijvoorbeeld enkele stuks voor prototypen) of wanneer er veel grillige vormen in de producten voorkomen. Uiteraard moet men ervoor zorgen dat alleen te snijden producten of alleen te ponsen/knabbelen producten in één plaat genest worden. In uitzonderingsgevallen kunnen beide bewerkingsprocessen nodig zijn. Er bestaan machines die in één opspanning beide processen kunnen uitvoeren. Voor het voorbeeldproduct kan lasersnijden nodig zijn, indien er geen ponsgereedschap beschikbaar is voor de scherpe hoeken van de trapeziumvormige gaten in de vlakken J en K. Ook als de dambreedte (zie ook figuur 7.10) tussen de sleuven in vlak K klein is, kunnen deze gaten niet geponst worden.

Lasersnijden

Ook bij lasersnijden vereisen de genoemde details bijzondere aandacht: bij een scherpe hoek moet de snijsnelheid vaak worden gereduceerd in verband met traagheidseffecten (het 'uit de bocht lopen') van de machine. Bij smalle ribben wordt de warmteontwikkeling binnen de perken gehouden door het terugregelen van het vermogen dat door de laser geleverd wordt (zie ook paragraaf 6.2.1 over de warmtebeïnvloede zone). Het bepalen van de bewerkingsvolgorde is betrekkelijk eenvoudig. Meestal worden eerst van alle producten de binnencontouren uit de plaat gesneden, vervolgens de buitencontouren. Op deze wijze behoudt de plaat zo lang mogelijk haar stijfheid, waardoor de nauwkeurigheid verhoogd wordt.

Ponsen/knabbelen

De hele buitencontour van het voorbeeldproduct kan geknabbeld worden met een rechthoekige pons indien deze geroteerd kan worden om de schuine zijden te bewerken. Indien roteren niet mogelijk is,



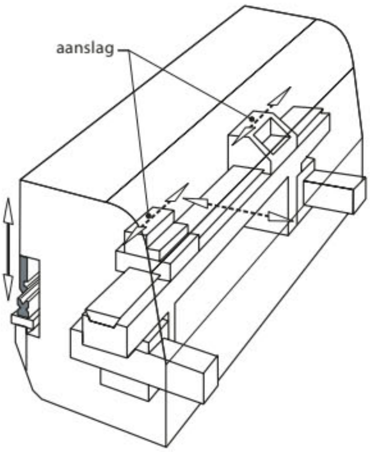
Figuur 14.37 Mogelijkheden voor het ponsen/knabbelen van een sleuf

kunnen de schuine zijden geknabbeld worden met een ronde pons, of eventueel met een rechthoekige pons die onder de juiste hoek in zijn houder is gemonteerd. Wordt de hele buitencontour met één pons bewerkt, dan worden de maximale afmetingen van die pons begrensd door de afstand tussen de lippen A en B én door de afstand tussen de producten in de plaat (zie figuur 14.36). Wanneer de sleuven in vlak K met dezelfde pons worden bewerkt, kan men een pons kiezen waarvan de breedte overeenkomt met die van de sleuven.

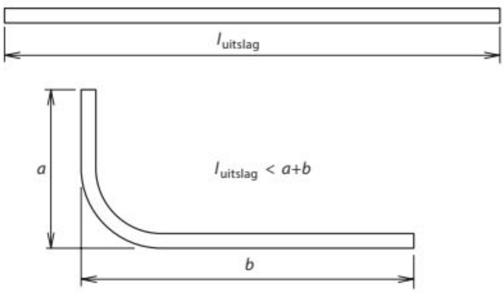
Het afgeronde sleufgat in vlak H kan op verschillende manieren worden bewerkt:

- Met een ponsgereedschap van precies die vorm en afmetingen. Dit kan wanneer het ontwerp wordt afgestemd op een bestaande pons (zie figuur 14.37a).
- Knabbelen met een ronde pons (zie figuur 14.37b).
- De uiteinden met een ronde pons en het tussenliggende deel knabbelen met een vierkante of rechthoekige pons (zie figuur 14.37c).
- Knabbelen met een aan twee zijden afgeronde rechthoekige pons (zie figuur 14.37d).
- Met een rechthoekige pons met één afgeronde kant (zie figuur 14.37e). In dat geval moet het gereedschap 180° kunnen worden geroteerd.

Het hangt van de beschikbare gereedschappen en van de capaciteit van het gereedschapsmagazijn van de machine af welke oplossing men uiteindelijk kiest. Ook de toelaatbare ruwheid kan een rol spelen.
Grote gaten, zoals het gat in de vlakken I en L, leveren een extra probleem op. Deze gaten kunnen vaak



Figuur 14.38 Aanslagen op een kantpers



Figuur 14.39 Uitslaglengte en productlengte

niet in één keer geponst worden. Dit lukt bijvoorbeeld niet als er geen ponsgereedschap van de juiste vorm en afmetingen beschikbaar is, of als de kracht van de ponsknabbelmachine niet toereikend is. Wanneer alleen de contour geknabbeld wordt, blijft er afvalmateriaal uit het midden van het gat achter. Sommige machines beschikken over een voorziening om dat af te voeren. Een andere mogelijkheid is om die delen handmatig uit te nemen. Een derde mogelijkheid is het geheel verschrotten van het gat, dat wil zeggen dat vanuit het midden begonnen wordt met knabbelen tot het hele gat is bewerkt.

14.8.3 Buigen

Het buigproces

In hoofdstuk 4 hebben we een aantal buigprocessen behandeld. Strijkbuigen en zwenkbuigen zijn vooral geschikt voor het buigen van producten met lange buigassen, zoals kastwanden en panelen.

Het grote voordeel van vrij buigen is dat met één set gereedschappen platen van verschillende dikten gebogen kunnen worden. Dit kan met matrijsbuigen niet. Daarnaast kunnen er verschillende buighoeken gerealiseerd worden door de keuze van de stempelverplaatsing. Vooral in de kleinseriefabricage levert dat een reductie van inrichttijden op. Om deze redenen hebben we voor het voorbeeldproduct vrij buigen gekozen. Dit wordt ook wel kanten genoemd. Vaak wordt dit proces met numeriek bestuurde kantpersen uitgevoerd (zie figuur 13.46), omdat alleen daarmee een hoge nauwkeurigheid van de stempelverplaatsing te realiseren is. Er is ook een programmeerbare aanslag aanwezig (zie figuur 14.38), waarmee de plaats van de buiglijn snel en nauwkeurig kan worden ingesteld.

De keuze van het buigproces heeft enige invloed op de afmetingen van de uitslag. Bij het vaststellen van de afmetingen van de uitslag moet men er rekening mee houden dat de lengte van de uitslag (zie figuur 14.39) bepaald wordt door de plaatdikte, de stempelradius en het buigproces. Het berekenen van de juiste uitslag is een complex probleem.

De buigvolgorde

Nu zullen we een aantal aspecten van het bepalen van de buigvolgorde worden toelichten. We kunnen deze onderverdelen in aspecten op het gebied van botsingen, de nauwkeurigheid en het hanteren van het product. Botsingen moeten uiteraard vermeden worden. Ten aanzien van de nauwkeurigheid en het hanteren bestaat een aantal regels. In de praktijk wordt het bepalen van de buigvolgorde nog vaak aan de machinebediener overgelaten. Bij complexe en vooral bij nauwkeurige producten levert deze aanpak echter steeds meer problemen op. Dan bieden computerondersteunde werkvoorbereidingssystemen (CAPP) voor het snijden en buigen van producten uit plaat goede ondersteuning.

Botsingen

De buigvolgorde mag niet leiden tot botsingen. Botsingen kunnen optreden tussen:
- delen van het product onderling, omdat er altijd iets verder gebogen (doorgezet) moet worden om elastische terugvering te compenseren;
- delen van het product en de machine (kantpers) of de gereedschappen. Soms moeten er speciale gereedschappen gekozen of samengesteld

worden, die extra ruimte vrijlaten voor bepaalde delen van het product (zie figuur 4.35);
- gereedschappen onderling. Dit is vooral een probleem wanneer op de machine meer dan één set gereedschappen gemonteerd is.

Om de inrichttijden te beperken moet het gebruik van speciale gereedschappen zo veel mogelijk vermeden worden.
Voor elke buiging moet een botsingsanalyse worden uitgevoerd. Hierbij moet rekening worden gehouden met de dan geldende vorm van het werkstuk.

De nauwkeurigheid

Bij het buigen kunnen afwijkingen optreden.
De belangrijkste afwijkingen zijn:
- afwijkingen in de gebogen hoek;
- afwijkingen van de gestrekte lengte;
- positioneerfouten (zie figuur 14.40).

Zowel de buigvolgorde als de wijze van positioneren kan de nauwkeurigheid van een product beïnvloeden. De invloed van deze fouten kan pas bepaald worden na een uitgebreide analyse, die computerondersteuning vereist. Om die reden volstaan we hier met het geven van enkele vuistregels.

Regels voor het positioneren:

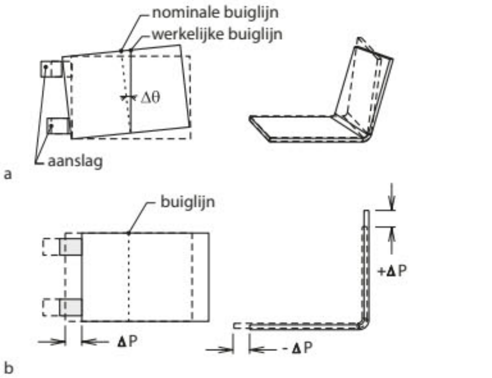
P1: Wanneer de afstand *m* tussen vlak J en K (zie figuur 14.41) nauw is getolereerd (kleiner dan IT 12), moet een van beide vlakken bij het buigen van het tweede vlak als aanslagvlak dienen.

P2: Wanneer het bovenstaande niet mogelijk is, kies dan een aanslagvlak met een zo hoog mogelijke nauwkeurigheid ten opzichte van een van beide vlakken.

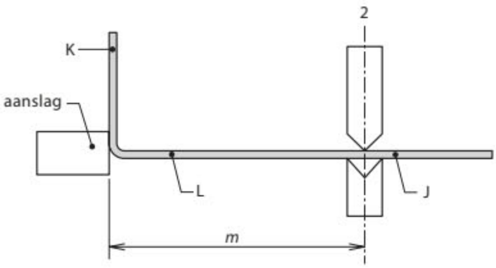
Regels voor de buigvolgorde:

V1: Het is vaak handig om in een product een centraal vlak aan te wijzen. Dit is een relatief groot vlak dat ongeveer in het midden van het product ligt. Buiglijnen die direct aan het centrale vlak grenzen worden bij voorkeur laat gebogen, vooral als het andere aangrenzende vlak ook groot is. Dit vermindert de kans op botsingen en de noodzaak om speciale gereedschappen te gebruiken.

V2: Buiglijnen die slechts één enkel vlak met de rest van het product verbinden worden vroeg gebogen, zeker als het betrokken vlak relatief klein is.



Figuur 14.40 Rotatiefout (a) en translatiefout (b) bij het positioneren van een plaatwerkproduct



Figuur 14.41 Keuze van het aanslagvlak bij nauwkeurig getolereerde maat '*m*' van het product uit figuur 14.35

V3: Buiglijnen die in elkaars verlengde liggen worden bij voorkeur tegelijkertijd gebogen.

V4: Als een bepaalde buiglijn gebogen is, buig dan een volgende parallelle buiglijn aan dezelfde kant van het centrale vlak (indien mogelijk).

V5: Houd het grootste deel van het product naar de machinebediener gericht. Dit vergemakkelijkt het positioneren van het product en het ondersteunen daarvan tijdens het buigen.

De regels voor de buigvolgorde passen we hierna op het productvoorbeeld uit figuur 14.35 toe. Het is een goede oefening om figuur 14.35b te kopiëren, uit te knippen en de buigingen uit te voeren.

Het centrale vlak is vlak L, begrensd door de buiglijnen 1, 2 en 3. Deze buiglijnen worden dus bij voorkeur 'laat' gebogen (regel V1).

De buiglijnen 4, 5, 6, 7, 8 en 9, die maar één vlak met de rest van het product verbinden, worden bij voorkeur in het begin gebogen (regel V2).

De buiglijnen 3, 5, 6, 7 en 8 kunnen in één bewerking gebogen worden, zolang 1 en 2 nog niet gebogen zijn (regel V3).

Het buigen van lijn 9 ná lijn 3 en 4 kan botsingen veroorzaken.

Na lijn 4 bij voorkeur lijn 3 buigen (regel V4).

De voorkeursbuigvolgorde wordt dan:
- lijn 9 als eerste, hiervoor is een speciaal gereedschap nodig met de lengte van buiglijn 9;
- lijn 4 als tweede;
- de lijnen 3, 5, 6, 7 en 8 tegelijkertijd als derde;
- de lijnen 1 en 2 in willekeurige volgorde. Bij de eerste van deze twee buigingen (bijvoorbeeld lijn 2) is de rotatiefout groot vanwege het asymmetrische aanslagvlak (zie p in figuur 13.34b). Deze fout is te beperken door ook het vlak q tegen een aanslag te plaatsen. Bij het buigen van de tweede buiglijn dient het laatst gevormde vlak als aanslagvlak, bijvoorbeeld vlak J bij het buigen van lijn 1.

Als de maat tussen vlak H en vlak L echter een tolerantie heeft kleiner dan IT 12, kan er een aangepaste volgorde nodig zijn. In dat geval kan het nodig zijn om vlak H als aanslagvlak te kiezen bij het buigen van lijn 3 (regel P1). Dit kan weer tot gevolg hebben dat de afmetingen van de vlakken A, B, C en D te veel gaan verschillen, doordat de rotatiefouten bij deze manier van positioneren te groot worden. In dat geval worden de lijnen 5, 6, 7 en 8 tegelijkertijd gebogen en vervolgens lijn 3. Bij het buigen van de lijnen 5, 6, 7 en 8 moet dan wel een onderbroken matrijs gebruikt worden (vlak I wijst tijdens het buigen schuin omlaag). Is deze matrijs niet beschikbaar, of is er geen ruimte op de kantpers om deze samen te stellen, dan moeten eerst de lijnen 5 en 6 gebogen worden en vervolgens de lijnen 7 en 8. Het gebruik van modulair gereedschap, samengesteld uit betrekkelijk korte delen, levert hierbij een voordeel op: dit verkort de inrichttijden, en het is dan eenvoudiger om stempels en matrijzen met de vereiste uitsparingen samen te stellen.

Samenvatting

Productievoorbereiding is het opstellen van fabricagemethoden voor onderdelen of samenstellingen van producten. Het vormt de schakel tussen de productontwikkeling en de uitvoering van de fabricage. Productontwikkeling en productievoorbereiding moeten in nauwe relatie met elkaar worden uitgevoerd.

De werkvoorbereiding voor de onderdelenfabricage is onder te verdelen in een macrowerkvoorbereiding en een microwerkvoorbereiding. Bij de macrowerkvoorbereiding wordt het bewerkingsplan uitgewerkt tot en met de werkverdeling per opspanning. Hierbij hoort in elk geval het bepalen van de productgebonden gereedschappen die hiervoor nodig zijn. De microwerkvoorbereiding geeft een gedetailleerd bewerkingsplan per opspanning. Bij de enkelstuks- en kleinseriefabricage wordt de microwerkvoorbereiding vaak overgelaten aan de vakman die de machine bedient.

Giet- en smeedstukken moeten statisch bepaald worden opgespannen voorafgaand aan de eerste verspanende bewerkingen. Op bewerkte vlakken is statisch onbepaald spannen mogelijk. Het aantal opspanningen moet zo klein mogelijk gehouden worden. Nauwkeurige bewerkingen moeten aan het eind van het bewerkingsproces worden uitgevoerd. Vlakken waarvan de onderlinge posities nauwkeurig gedefinieerd zijn, moeten in één opspanning worden bewerkt. Gebeurt dit niet, dan dient de bewerking plaats te vinden terwijl het andere vlak als aanslagvlak fungeert.

Nauwe toleranties en hoge oppervlaktekwaliteiten kunnen alleen in een aantal bewerkingsstappen worden bereikt. Deze zijn ook van belang voor de te kiezen bewerkingstoeslagen.

Aan de hand van een voorbeeld van het verspanend bewerken van een gietstuk hebben we laten zien dat voor één product meerdere oplossingen mogelijk zijn, elk met hun eigen voor- en nadelen.

Aan de hand van een voorbeeld van de werkvoorbereiding van het uitsnijden en buigen van een plaatdeel hebben we beschreven hoe men de methode voor het vervaardigen van de uitslag kiest, en hoe men de buigvolgorde bepaalt.

Computerondersteuning maakt een hogere kwaliteit van de werkvoorbereiding in kortere tijd mogelijk.

Literatuur

14.1 Halevi G., *Process and Operation Planning*, revised edition of the principles of process planning: a logical approach, Springer, 2003, ISBN 978-1-4020-1653-0.

14.2 Nolen, J., *Computer-Automated Process Planning for World-Class Manufacturing*, Marcel Dekker, 1989, ISBN 978-0-8247-7918-4.

14.3 Groover M.P., *Principles of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems*, 5th edition, John Wiley & Sons Inc., 2013, ISBN 978-1-118-47140-1.

inclusief website!

Op www.industrieleproductie.nl vind je de antwoorden op deze vragen, maar ook extra studie- en oefenmateriaal, zoals video's en meer opgaven.

Oefenvragen

14.1 De microwerkvoorbereiding voor verspanende bewerkingen kan zowel door de afdeling werkvoorbereiding als door de machinebediener worden verricht. Welke invloed heeft de seriegrootte op de keuze voor een van beide?

14.2 Verklaar de achtergrond van de 3-2-1-methode zoals deze wordt toegepast bij het spannen van werkstukken.

14.3 Noem vier gegevens uit de werktekening die van belang zijn bij het opstellen van een bewerkingsplan. Laat zien wat de belangrijkste keuzeaspecten zijn.

14.4 Waarop baseert men de verdeling van de bewerkingen over de opspanningen?

14.5 Welke parameters bepalen bij het vrij buigen de buighoek en de positie van de buiglijnen?

14.6 Wat zijn de verschillen tussen de taken van de werkvoorbereider bij reproducerende bewerkingen en niet-reproducerende (=genererende) bewerkingen?

14.7 Wat is het belang van een conceptuele werkvoorbereiding in het ontwerptraject?

14.8 Geautomatiseerde werkvoorbereidingssystemen werken volgens het variantprincipe of volgens het generatieve principe. Beschrijf de toepassingsgebieden van de beide principes.

14.9 Welke soorten gegevens met betrekking tot verspanende gereedschappen heeft men nodig voor de werkvoorbereiding en de programmering van NC-gereedschapswerktuigen?

15 Het productiebedrijf

In dit hoofdstuk plaatsen we belangrijke delen van de stof uit eerdere hoofdstukken in een breder kader. We kijken hier namelijk naar het productiebedrijf als één systeem van met elkaar samenhangende functies. We introduceren begrippen en modellen waarmee systemen en processen kunnen worden beschreven. We classificeren productiesystemen op basis van functie, plaats in productieketen en productievolume. We behandelen ook de fabricage van producten in massa, in serie en als enkel product.
We presenteren in dit hoofdstuk een referentiemodel voor een fabricagesysteem voor de kleinseriefabricage en beschrijven het productieproces in termen van activiteiten, order- en informatiestromen. Hierbij komen de werkwijze, besturing, het informatiebeheer, de procesintegratie en procesbeheersing aan de orde. Ten slotte besteden we aandacht aan de besturing van goederenstromen en werkplaatsen, en gaan we in op organisatiestructuren.

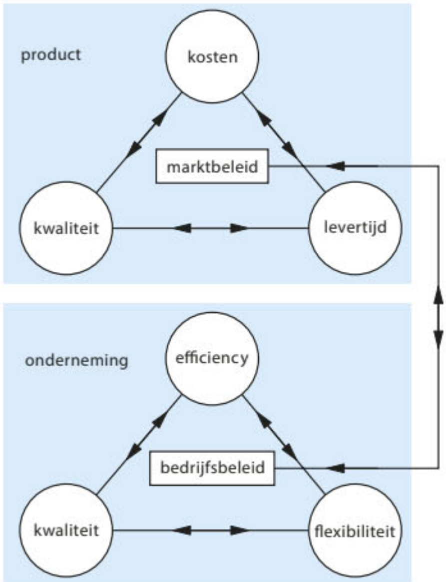
15.1 Het bedrijf in zijn omgeving

De omgeving van een bedrijf wordt enerzijds gevormd door de markt, afnemers en concurrenten, en anderzijds door de leveranciers en door de maatschappij als geheel.
Sinds enkele decennia wordt de situatie in de industriële productie steeds meer gekenmerkt door de markt en de producten en productieprocessen die daaruit voortvloeien.

Kenmerken van de markt zijn:
- de wereldmarkt;
- overcapaciteit;
- kritische, veeleisende klanten.

Kenmerken van de producten en de productieprocessen die daaruit voortvloeien zijn:
- hoge productcomplexiteit;
- groot aantal productvarianten;
- korte productlevenscycli;
- korte levertijden;
- hoge productkwaliteit;
- hoge druk op de productiekosten.

Veranderende marktomstandigheden vereisen een aanpassing van het bedrijfsbeleid. Figuur 15.1 geeft de factoren die daarbij een belangrijke rol spelen schematisch weer, inclusief de samenhang daartussen. Een goede afstemming van deze factoren vormt een aanzienlijk probleem, en het komt geregeld voor dat de noodzaak ervan onderschat wordt. Afhankelijk van het marktsegment en de toestand van de markt kan men prioriteiten stellen voor de factoren uit de figuur. Vaste regels zijn hiervoor niet te geven. Inzicht en ervaring in de markt zijn onontbeerlijk voor het tot stand brengen van een passend bedrijfs-



Figuur 15.1 De samenhang tussen het marktbeleid en het bedrijfsbeleid

beleid, evenals een goede kennis van de positie en het functioneren van het eigen productiebedrijf in de markt. Het hogere bedrijfsmanagement moet met name invulling geven aan wat men aanduidt met de allesomvattende kwalificatie 'goed ondernemerschap'. Het is vervolgens de taak van het productiemanagement om een en ander uit te (laten) voeren.

Daarnaast maakt iedere organisatie deel uit van de maatschappij en functioneert zij binnen de grenzen die de maatschappij haar oplegt. De randvoorwaarden voor het functioneren van een productiebedrijf binnen een steeds complexer wordende maatschappij, worden gevormd door wetten en richtlijnen op het gebied van milieu, belasting en subsidies, industrieel eigendom, sociale voorzieningen, arbeidsomstandigheden, productaansprakelijkheid, en de CAO's tussen werkgevers en werknemers die voor een bepaalde termijn zijn afgesloten.

15.2 Het productiesysteem

In deze paragraaf richten we onze aandacht op het productiesysteem. We behandelen eerst verschillende systeembegrippen en criteria op grond waarvan productiesystemen kunnen worden geclassificeerd. Vervolgens bespreken we verschillende fabricagetypen: massafabricage, seriefabricage en enkelstuksfabricage of projectmatige fabricage.

15.2.1 Systeembegrippen

De systeembeschouwing is een hulpmiddel bij de beschrijving van de werking van samengestelde processen. Deze methode biedt de mogelijkheid deelfuncties in samenhang met hun omgeving te bestuderen, zonder het functioneren van die omgeving zelf direct erbij te betrekken. De doelfunctie wordt opgedeeld in afzonderlijke subfuncties. In een productiesysteem zijn de aspectfuncties gericht op de coördinatie van de activiteiten in de afzonderlijke subsystemen. Zij vormen zeer belangrijke onderdelen van de besturing van het geheel. Categorische coördinatieaspecten zijn bijvoorbeeld de informatiestroom- en kwaliteitsbeheersing, het personeelsbeleid, onderhoud en de energievoorziening.

Een **systeem** is een verzameling elementen die binnen de totale werkelijkheid te onderscheiden is, afhankelijk van het door de onderzoeker gestelde doel. Deze elementen hebben onderlinge relaties en (eventueel) relaties met andere elementen uit de totale werkelijkheid. **Elementen** zijn de kleinste delen die de onderzoeker op basis van zijn doel wenst te beschouwen. In dit geval laat men buiten beschouwing dat ze uit nog kleinere bouwstenen kunnen bestaan. Elementen hebben bepaalde eigenschappen. Aan die eigenschappen worden vaak waarden toegekend. Gegeven relaties beschrijven de samenhang tussen de elementen.

Met **universum** wordt de totale werkelijkheid aangeduid. De **omgeving** van het beschouwde systeem wordt gevormd door elementen uit het universum die niet bij het systeem horen. Deze elementen kunnen invloed uitoefenen op het systeem, of juist door het systeem worden beïnvloed. Tussen het systeem en de omgeving ligt de **systeemgrens**. Een **model** is een vereenvoudigde afbeelding van een bepaald gedeelte van de werkelijkheid: het gedeelte dat voor het bereiken van een vooropgesteld doel (met een zekere nauwkeurigheid) in het model moet worden opgenomen.
Een **aspectsysteem** is een deelverzameling van de relaties in het systeem. Alle elementen blijven hierbij onveranderd behouden. Een **subsysteem** of **deelsysteem** is een deelverzameling van de elementen in het systeem. Hierbij blijven alle oorspronkelijke relaties tussen deze elementen onveranderd behouden.
Onder een **black box** verstaan we een systeem (of een subsysteem) waarvan de interne elementen en relaties bij de onderzoeker (nog) niet bekend zijn, of die hij (vooralsnog) buiten beschouwing laat.

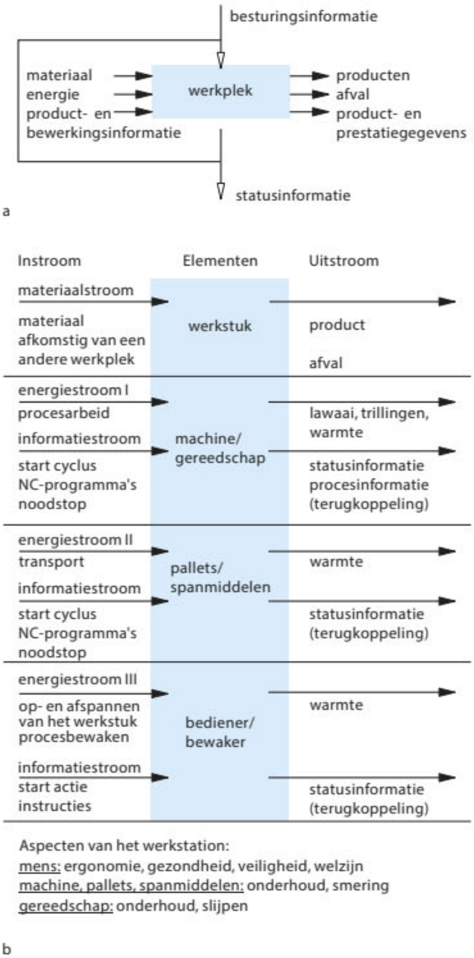
Als voorbeeld van het denken in systemen en modellen beschrijven we hieronder een model van 'de werkplek'.

Het subsysteem **werkstation** (zie figuur 15.2) heeft als functie materiaal zo te behandelen dat er een product met vooraf bepaalde eigenschappen ontstaat. Om dat doel te bereiken, zijn hulpmiddelen (machines, gereedschappen, pallets en spanmiddelen), informatie, energie en eventueel mensen nodig. Voortdurend wordt de werkelijke status van het proces bewaakt en vergeleken met de gewenste situatie en worden eventuele afwijkingen gecorrigeerd. Smering en onderhoud (hulpmiddelen), personeelsbeleid, welzijn, verzorging, veiligheid, kwaliteit en informatie vormen beheersaspecten. Deze aspecten zijn samengebracht in de verschillende aspectsystemen en onderhouden de betreffende relaties tussen de subsystemen (bijvoorbeeld

werkstations). In het algemeen worden materiaal, energie en informatie als de in- en uitvoer van een subsysteem beschouwd.

Een **productiesysteem** als geheel kan worden gedefinieerd als een begrensd complex van mensen en middelen, bijeengebracht om in geordend verband een pakket van gelijksoortige of anderszins bij elkaar passende producten voort te brengen.

Een productiesysteem bevat deelsystemen waarin activiteiten worden uitgevoerd (zie figuur 15.3). We kunnen informatie- en materiaalstromen onderscheiden tussen de verschillende deelsystemen onderling en tussen een productiesysteem en haar omgeving. De meeste productiesystemen vormen een combinatie van een ontwerpsysteem, een productievoorbereidings- en werkvoorbereidingssysteem, een plannings- en besturingssysteem en een of meer fabricagesystemen en assemblagesystemen. Het kwaliteitssysteem en het bedrijfsinformatiesysteem worden opgevat als aspectsystemen met relaties met ieder subsysteem. Aspectsystemen verzorgen de coördinatie van de communicatie, de besturing en de kwaliteit in de diverse subsystemen. Ze bewaken ook de toestand (bijvoorbeeld de veiligheid). Het bedrijfsinformatiesysteem vormt als het ware het centrale zenuwstelsel van het totale productiesysteem. De behoefte aan communicatie tussen de verschillende productiefuncties is zo veelomvattend dat we dit aspectsysteem in figuur 15.3 symbolisch hebben aangegeven met een grijze rechthoek.

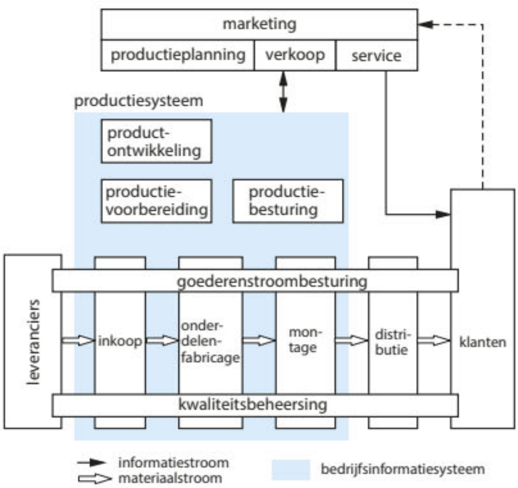


Figuur 15.2 Het subsysteem werkstation: globaal (a) en in detail (b)

15.2.2 Classificatie van productiesystemen

We kunnen productiesystemen classificeren op grond van verschillende criteria:

a Op basis van de mate waarin de **klantenorder** de productie stuurt:
  - produceren op voorraad op basis van afzetprognoses (scheerapparaten);
  - assembleren van eindproducten op order met componenten uit voorraad (personenauto's);
  - assembleren van componenten op order met onderdelen of subcomponenten uit voorraad (rompsectie verkeersvliegtuig);



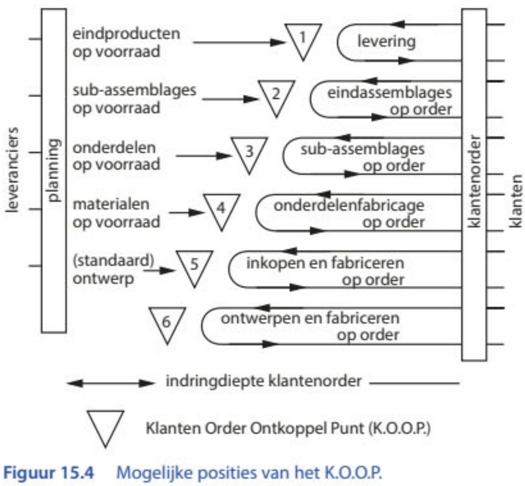
Figuur 15.3 Een productiesysteem

- fabriceren van onderdelen op order met materialen uit voorraad (staalconstructie);
- aanschaffen van materialen en fabriceren op order (productspecifieke gietstukken);
- ontwerpen en fabriceren op order (gebouw, boorplatform).

Het punt in de productieketen van waaraf de productie door de klantenorder wordt gestuurd, staat bekend als het **klantenorderontkoppelpunt (K.O.O.P.)**. Als gevolg van de veranderende markt (zie paragraaf 15.1) verschuift het K.O.O.P. verder naar voren in de productieketen. De indringdiepte van de klantenorder in de productieorganisatie wordt dus groter. Daarmee neemt de noodzaak van het verwerken van meer technische en besturingsinformatie toe. Personenauto's werden vroeger bijvoorbeeld op voorraad geproduceerd op basis van afzetprognoses. Tegenwoordig assembleert men ze zoals gezegd meestal op order met componenten uit voorraad. In figuur 15.4 geven we een overzicht van de mogelijke posities van het K.O.O.P.

b Op basis van het **fabricagetype** (seriegrootte van de orders):
  - massafabricage, enige honderdduizenden tot miljoenen stuks per jaar;
  - seriefabricage, eenmalige of meermalige orders, enkele tot honderdduizenden stuks per order;
  - enkelstuks- of projectmatige fabricage, een tot enkele product(en).

c Op basis van de plaats in de **bedrijfskolom**:
  - een basisproductiesysteem gebruikt natuurlijke grondstoffen (erts, hout) om materialen voor andere productieprocessen te vervaardigen;
  - een omzettingsysteem verandert de producten van een basisproductiesysteem in allerlei industriële producten en gebruiksproducten. Deze producten worden vaak **halffabricaten** genoemd (metaalplaten, papier, triplex);
  - een fabricagesysteem zet de producten van een omzettingsysteem om in een nog grotere verscheidenheid aan producten (nietjes, papierartikelen, bevestigingsmiddelen, productspecifieke onderdelen);
  - een assemblagesysteem combineert producten van fabricagesystemen tot eindproducten (wasmachines).



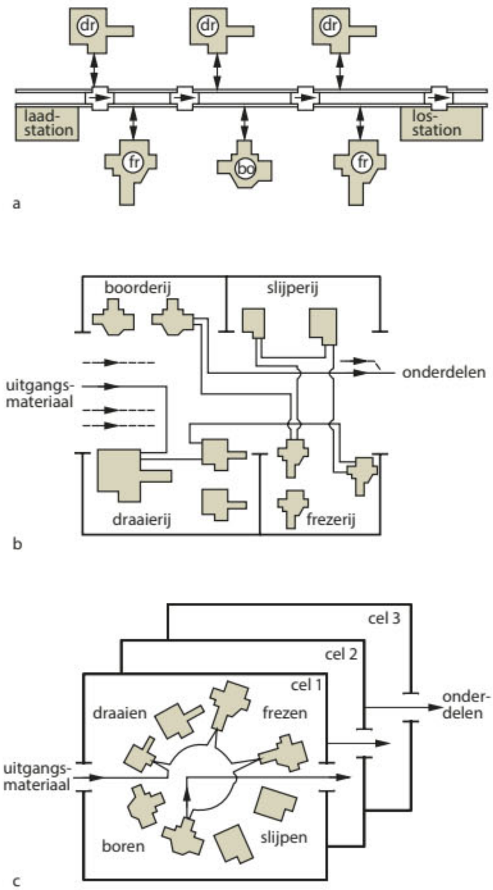
Figuur 15.4 Mogelijke posities van het K.O.O.P.

d Op basis van de inrichting van de fabricageafdelingen (zie figuur 15.5):
  - lijnstructuur;
  - departementale structuur of afdelingsstructuur;
  - celstructuur.

Er bestaat een duidelijk verband tussen het fabricagetype en de inrichting van de fabricageafdelingen.

Massafabricage wordt in het algemeen gekenmerkt door een vaste **routing** van de producten langs de machines. Op deze machines worden de benodigde bewerkingen in een vaste volgorde en met een uitgebalanceerde totale bewerkingstijd per machine uitgevoerd. Voor dit fabricagetype is een **lijnstructuur** geschikt.

Bij **seriefabricage** van een groot aantal verschillende orders bestaan vaak bewerkingsgerichte afdelingen (draaierij, frezerij, bankwerkerij enzovoort). Deze structuur staat bekend als een **departementale structuur** of **afdelingsstructuur**. Bij deze structuur zijn alle proceskennis en hulpmiddelen per afdeling geconcentreerd. Het is mogelijk een hoge bezettingsgraad van de machines te bereiken. De structuur kent echter ook nadelen. Voor de verschillende typen bewerkingen verhuizen de producten steeds naar een andere afdeling. Voor de uitvoerenden is er daarom weinig zicht op het eindproduct; de productiebesturing is gecompliceerd. De doorlooptijd is lang – voor elke opvolgende bewerkingsstap moet het product opnieuw op zijn beurt wachten – en de daarmee samenhangende tussenvoorraden zijn groot. Dit verhoogt de kosten en bemoeilijkt het flexibel reageren op veranderingen in de marktvraag.



Figuur 15.5 Structuren van fabricagesystemen: lijnstructuur (a), departementale structuur (b) en celstructuur (c)

Daarom worden deze afdelingen in steeds meer bedrijven omgezet in een structuur van groepen waarin families van producten worden gefabriceerd (zie paragraaf 15.3.3). Dan spreekt men van een **productgerichte structuur** of **groepsstructuur**. Alle middelen die nodig zijn voor een productfamilie zijn in de groep aanwezig. De routing, oftewel de weg die de producten langs de bewerkingsstations volgen, kent veel vrijheid. De bezettingsgraad is bij deze structuur lager, maar dit wordt meer dan goedgemaakt door het feit dat de producten niet steeds naar een andere afdeling hoeven te verhuizen. Hierdoor houdt men overzicht. Het groeperen van verschillende typen machines in productgerichte fabricagecellen levert de **celstructuur** op. Bekende celstructuren zijn de flexibele fabricagecellen (FFC) en de geautomatiseerde flexibele fabricagesystemen (FFS). Flexibele fabricagecellen zijn afgestemd op een zekere breedte in het werkaanbod. Flexibele fabricagesystemen hebben we in hoofdstuk 13 behandeld.

Bij **enkelstuksfabricage** is nauwelijks sprake van een specifieke structuur.
Omdat het fabricagetype binnen een productiebedrijf zo'n cruciale rol speelt, bespreken we in de volgende paragrafen kort massafabricage, seriefabricage en enkelstuksfabricage. In het daarop volgende deel van dit hoofdstuk staat de kleinseriefabricage centraal, een fabricagetype waarbij diversiteit en flexibiliteit in de productie een grote rol spelen.

15.2.3 Massafabricage

Massafabricage is de productie van series van enige honderdduizenden tot miljoenen producten die gedurende lange perioden (maanden, jaren) worden gefabriceerd. De massafabricage van relatief eenvoudige producten die in weinig varianten op de markt worden aangeboden, wordt in het algemeen gekenmerkt door een productgerichte, functioneel ingedeelde organisatie met vergaand doorgevoerde taakverdelingen, waarmee een hoge efficiency wordt bereikt. Je kunt hierbij bijvoorbeeld denken aan gloeilampen, verbrandingsmotoren voor auto's en scheerapparaten.

De grote productaantallen rechtvaardigen de hoge investeringen in speciaalmachines en kostbare productgebonden gereedschappen. Met name niet-verspanende processen (spuitgieten, dieptrekken, ponsen) zijn geschikt voor massafabricage. Hierbij is het gereedschap een informatiedrager en zijn de onderdelen in de regel relatief eenvoudig. Bij onderdelen met een meer complexe geometrie en een hoge vormnauwkeurigheid, en bij materialen die niet geschikt zijn voor oervormen of omvormen, is men vaak aangewezen op verspanende processen. De geometrische informatie wordt hierbij overgedragen door de gereedschapsbesturing. Om het gevraagde productietempo te bereiken, is men aangewezen op diverse machines in lijn of parallel, of op speciaalmachines met meerdere, elkaar opvolgende, bewerkingsstappen. Dit zorgt voor een probleem dat vergelijkbaar is met een probleem dat we bespraken in hoofdstuk 11 over montage: het op elkaar afstemmen van de verwerkingscapaciteiten van de verschillende bewerkingsstations.

Veranderingen in de productie van massaproducten zijn kostbaar en tijdrovend; daarom is dit fabricagetype weinig flexibel. Bovendien is massafabricage storingsgevoelig. Een storing op een van de machines in een productielijn heeft direct gevolgen voor de opbrengst per tijdseenheid.

Bij massafabricage ligt de nadruk op de beheersing van de productieketen (zie figuur 15.3: leveranciers, inkoop, onderdelenfabricage, assemblage, distributie, klanten). De benodigde productinformatie ligt voor een groot deel vast in de gebruikte gereedschappen en apparatuur. De informatiestroom is relatief eenvoudig. Hetzelfde geldt voor de materiaalstroom, en dus voor de logistiek. De productiemiddelen voor de gehele fabriek worden op de lange termijn gepland.

15.2.4 Seriefabricage

Seriefabricage vereist een flexibel gebruik van materialen, gereedschappen, spanmiddelen en machines. Iedere nieuwe order heeft tot gevolg dat het ontwerp, de werkvoorbereiding en logistieke planning opnieuw moeten worden uitgevoerd; bij herhalingsorders geldt dit alleen voor de logistieke planning. In de regel wordt de meeste productie-informatie gegenereerd tijdens de werkvoorbereiding van een order. Daardoor is de mate van beheersbaarheid en flexibiliteit van de fabricage sterk afhankelijk van het aantal productvarianten, de ordergrootte en het aantal wijzigingen (nieuwe orders). Uiteraard speelt ook de vereiste levertijd een belangrijke rol.

Bij seriefabricage van steeds weer eenmalige kleine productseries is de werkvoorbereiding een continue bezigheid. Dit vereist een flexibel gebruik van productiemiddelen in technisch en logistiek opzicht, en een snel opererende, flexibele productiebesturing. Elke order heeft een eigen routing door de werkplaats, waardoor problemen in de productiebesturing zich pas op de werkvloer manifesteren. In geval van een star (massa)fabricageproces zijn de onzekerheden tijdens de planning veel kleiner, omdat het merendeel van de orders een identieke routing door de werkplaats aflegt.

De benodigde investeringen die productgespecialiseerde productiesystemen met zich meebrengen zijn in het algemeen niet rendabel voor seriefabricage. Dit is dan ook het specifieke toepassingsgebied van de flexibele automatisering (zie hoofdstuk 13).

15.2.5 Enkelstuksfabricage of projectmatige fabricage

Onder **kleinseriefabricage**, **enkelstuksfabricage** of **projectmatige fabricage** verstaan we het fabriceren van zeer kleine aantallen producten. Men maakt hierbij voornamelijk gebruik van universele, soms nog handbediende machines. De werknemers moeten zeer vakbekwaam en flexibel zijn. Snel opkomende nieuwe materiaalaangroeitechnieken (zie hoofdstuk 8) worden hierbij steeds meer toegepast, vaak in samenhang met prototypebouw.
De productiviteit van kleinseriefabricage is veel lager dan van massafabricage. De kostprijs per product is veel hoger dan bij massafabricage. In figuur 15.6 vind je een aantal kenmerken van massafabricage, seriefabricage en enkelstuksfabricage.

15.3 Productiesystemen in de kleinseriefabricage

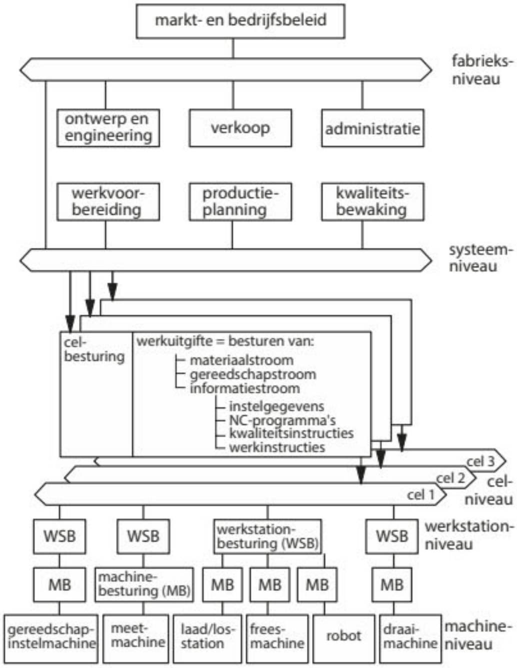
In deze paragraaf richten we ons specifiek op productiesystemen in de kleinseriefabricage. We kijken eerst naar de verschillende niveaus van dergelijke systemen. Vervolgens bespreken we de orderroute door het productiesysteem bij kleinseriefabricage, met speciale aandacht voor informatiebeheer. Ook groepentechnologie komt in deze paragraaf aan de orde. We sluiten dit deel van het hoofdstuk af met een bespreking van terugkoppeling en procesbeheersing.

Aspecten	Massafabricage	Seriefabricage	Enkelstuksfabricage
productiviteit	hoog	gemiddeld	laag
flexibiliteit	laag	gemiddeld	hoog
productspecifieke gereedschappen	veel	gemiddeld	weinig
vakbekwaamheid personeel	laag	gemiddeld	hoog
organisatie	productgericht	procesgericht	projectgericht

Figuur 15.6 Kenmerken van massa-, serie- en enkelstuksfabricage

15.3.1 Indeling in niveaus

De decompositie van een productiesysteem in deelsystemen of functies kan geschieden aan de hand van een referentiemodel. Hiermee kan men ook vaststellen welke functie verantwoordelijk is voor welke activiteit. Een top-downbenadering resulteert in een hiërarchische structuur. Deze structuur reduceert de complexiteit van het besturings- en beheerssysteem. In figuur 15.7 presenteren we een referentiemodel voor de kleinseriefabricage.



Figuur 15.7 Referentiemodel van een productiebedrijf voor de kleinseriefabricage

De verschillende deelsystemen of functies zijn verdeeld over vijf hiërarchische niveaus. De deelsystemen op **fabrieksniveau** besturen het gehele bedrijf en verzorgen de communicatie met klanten (verkoop, orderacceptatie enzovoort). Op dit niveau worden het ontwerp en de engineering uitgevoerd, evenals de strategische planningstaken (zie paragraaf 15.4) en de materiaalbehoefteplanning.

Op **productiesysteemniveau** worden de productievoorbereiding en de gedetailleerde capaciteitsbehoefteplanning uitgevoerd. Bovendien wordt de algehele kwaliteitsbeheersing vanaf dit niveau gestuurd.

Vanaf het **celniveau** tot het machineniveau zijn alle activiteiten gericht op het uitvoeren van de bewerkingsplannen die in de werkvoorbereiding zijn opgesteld. Iedere cel kan zijn voorzien van een eigen systeem voor de beheersing van informatie- en materiaalstromen. Belangrijke functies op dit niveau zijn:
- het maken van het **werkplan** (planning van de werkopdrachten in de tijd, zie figuur 15.15);
- **werkuitgifte** (het verstrekken van werkopdrachten aan de werkstations);
- transport van materialen, gereedschappen en spanmiddelen;
- het verstrekken van informatie in de vorm van werkstukprogramma's, werk- en kwaliteitsinstructies.

Een werkopdracht kan een bewerking op een bepaalde machine omvatten, maar ook het transport van pallets, gereedschappen en spanmiddelen tussen magazijn en werkstation, het op- of uitspannen van uitgangsmateriaal of tussenproducten, of het verwisselen van pallets op de machine.
De eigenlijke transformatie van uitgangsmateriaal naar gereed product vindt op het niveau van de werkstations plaats. Een werkstation kan een of meer bewerkingsmachines bevatten (al dan niet door mensen bediend).
Op machineniveau worden de feitelijke bewerkingen uitgevoerd.

15.3.2 Orderrouting en informatiebeheer

Om het specifieke karakter van de kleinseriefabricage te verduidelijken, beschrijven we in deze paragraaf de **orderroute** door het productiesysteem (raadpleeg hiervoor ook de figuren 15.3 en 15.7). Hierbij veronderstellen we dat de klantenorder het hele proces stuurt; het K.O.O.P. ligt dus vóór het ontwerpen.

De afdeling verkoop stelt in overleg met de klant het programma van eisen samen. Dit programma omvat de productomschrijving, de seriegrootte, de bestemming en de levertijd. De afdeling verkoop onderhoudt vervolgens ook het contact met de klant. Zo nodig wordt in samenspraak met de afdeling ontwerp en constructie de geschiktheid van de order voor het bedrijf beoordeeld. De eerstvolgende stap is het maken van een voorontwerp. Op basis hiervan worden de kostprijs en de benodigde productie-

capaciteit geschat. De productomschrijving, de verkoopprijs en de levertijd (mede bepaald door de beschikbare capaciteit), maken deel uit van de **offerte** (aanbieding). De verkoopafdeling stuurt de offerte naar de klant. Een definitieve offerte komt soms pas na onderhandelingen met de klant tot stand. Vaak heeft deze de keuze uit meerdere aanbiedingen.

We gaan ervan uit dat de klant de producent de order gunt, en dat de producent de order accepteert. Dan zet de afdeling ontwerp en constructie vervolgens de productomschrijving en het voorontwerp om in een definitief ontwerp. Dat ontwerp wordt, samen met de informatie die voor de vervaardiging noodzakelijk is, weergegeven in een productmodel (CAD-model). De onderdelen worden qua aard en aantallen ook nog apart in stuklijsten weergegeven. Vervolgens stelt de afdeling werkvoorbereiding een bewerkingsplan op. Deze afdeling berekent ook de te verwachten bewerkings- en behandeltijden en de vervaardigingskosten (voorcalculatie). Er worden daarnaast voorstellen gemaakt en uitgewerkt voor inkoop en uitbesteding, waarbij kostprijs en levertijd van belang zijn.

Daarna moet een order in de tijd worden gepland. Aan de hand van verzamelde gegevens over machinebezetting, de voorgeschreven machines en de berekende bewerkings- en insteltijden wordt de order gepland tussen de reeds lopende orders. De overeengekomen levertijd dient hierbij als uitgangspunt. Men houdt ook rekening met de benodigde tijd voor assemblage en beproeving. De mate van detail waarin men plant is afhankelijk van de omstandigheden, zoals het type werk en het scholingsniveau van het uitvoerend personeel. De planning resulteert in een werkplan.

De volgende stap is de werkuitgifte. Voordat de voorgaande werkopdracht gereedgekomen is, ontvangt ieder werkstation de volgende opdracht met de daarbij behorende materialen, hulpmiddelen en documenten. In de verschillende fabricagecellen worden de binnenkomende halffabricaten gecontroleerd, bewerkt en opnieuw gecontroleerd. Vervolgens worden deze verzonden naar een tussenmagazijn of de volgende fabricagecel. Tussenopslag is nodig wanneer er afstemmingsproblemen in de materiaalstroom zijn. Deze kunnen worden veroorzaakt door storingen en verschillen in seriegrootte, taaktijden en machinebezetting.

Ten slotte arriveren de volledig bewerkte onderdelen op de assemblageafdeling. Hier worden deze onderdelen tot eindproducten samengesteld, samen met onderdelen die inmiddels van buiten het bedrijf zijn geleverd en/of vanuit het magazijn zijn aangevoerd. De samengestelde producten worden hierna beproefd en na goedkeuring voor verzending gereedgemaakt en opgeslagen. Uiteindelijk vindt de aflevering aan de klant plaats. De afdeling verkoop wordt hiervan op de hoogte gesteld.

Voor de volledigheid noemen we hier ook nog de activiteiten die niet bij de feitelijke productie horen. Het betreft de ondersteuning van het product tijdens het gebruik, zoals het leveren van gebruiksinstructies en reservedelen, reparatie en onderhoud. Ook kunnen we hier activiteiten onder scharen die samenhangen met het einde van de levensduur van het product, zoals de inname, de (milieuvriendelijke) sloop en het hergebruik van materialen en componenten. De ontwerper van het product moet al rekening houden met hergebruik (zie hoofdstuk 16).

15.3.3 Groepentechnologie

De **groepentechnologie** maakt gebruik van de overeenkomsten tussen verschillende productonderdelen. Aan de hand van deze overeenkomsten worden de producten in groepen ingedeeld. De indelingscriteria kunnen verschillen al naargelang het toepassingsgebied. De methode om tot de gewenste indeling te komen hangt af van de mate van verfijning van de indeling. Een zeer globale indeling kan met een enkel woord gebeuren, bijvoorbeeld assen, schijven. Ook is het mogelijk producten in te delen naar de voornaamste bewerking, zoals gebogen of diepgetrokken producten. Voor een meer gedetailleerde indeling wordt aan de hand van meerdere, soms enkele tientallen, kenmerken een **classificatienummer** toegekend. Producten met hetzelfde classificatienummer komen in hoge mate met elkaar overeen.

Groepentechnologie bevordert standaardisatie in het gebruik van processen en productiemiddelen. Een andere belangrijke doelstelling is het realiseren van een betere structurering en vereenvoudiging van de informatieverwerking in ontwerp en werkvoorbereiding.

Bij het ontwerpen kan groepentechnologie worden toegepast om het geheel opnieuw ontwerpen van

(vrijwel) overeenkomstige producten te voorkomen. De ontwerper maakt een globale ontwerpschets en kent aan de hand daarvan een classificatie toe. Vervolgens zoekt hij met behulp daarvan in het archief naar delen die zonder meer, of met kleine aanpassingen, voor zijn ontwerp bruikbaar zijn. Dit stimuleert ook het gebruik van standaarddelen. Classificatiesystemen die ontwikkeld zijn ten behoeve van het ontwerpen, zijn bijvoorbeeld gericht op het gebruik van overeenkomsten in geometrie. Daardoor zijn ze minder geschikt voor het bepalen van overeenkomstige fabricagemethoden.

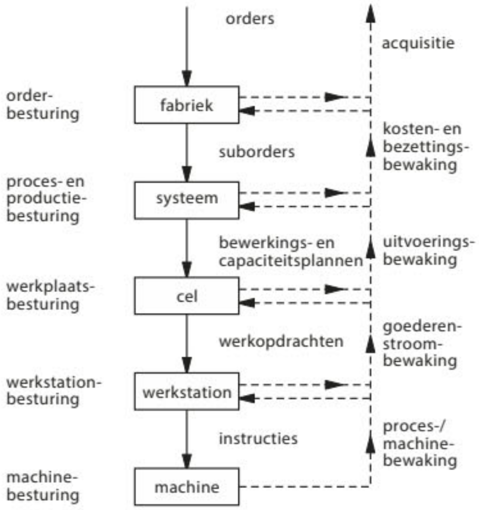
Een andere toepassing is het vormen van **productfamilies**, die met één groep machines bewerkt kunnen worden, al dan niet in dezelfde volgorde. Deze werkwijze wordt toegepast met het oog op het werken in een productgerichte structuur en het vereenvoudigen van de productiebesturing.

15.3.4 Terugkoppeling en procesbeheersing

Om een goede integratie van de verschillende deelsystemen van een productiesysteem te bereiken, zijn een goede communicatie, besturing en vooral ook een goede **terugkoppeling** van informatie tussen de verschillende besturingsniveaus vereist (zie figuur 15.8). De teruggekoppelde statusinformatie wordt vergeleken met de geplande situatie. Wanneer er verschillen worden gesignaleerd, kunnen dezelfde plannen, werkopdrachten of instructies worden aangepast of opnieuw worden opgesteld. De werkwijze is afhankelijk van de omstandigheden en de oorzaak van de verschillen.

Problemen die optreden tijdens de fabricage en assemblage kunnen in een vroeg stadium worden gesignaleerd, of zelfs worden voorkomen, als de informatie over maakbaarheid en kosten systematisch wordt geëvalueerd en teruggekoppeld naar de ontwerpafdeling. Het kunnen beschikken over deze informatie draagt bovendien bij tot een meer zinvolle en realistische keuze uit alternatieven bij het ontwerpen. Dit is een aspect van het **fabricagegericht ontwerpen** (zie ook hoofdstuk 16).

Tijdens het uitvoeren van een werkplan kunnen storingen optreden die de materiaalstroom lokaal onderbreken. Op basis van teruggekoppelde informatie kunnen nieuwe werkopdrachten worden uitgegeven. Indien nodig past men het werkplan aan om de gevolgen van de storing zo veel mogelijk te beperken.

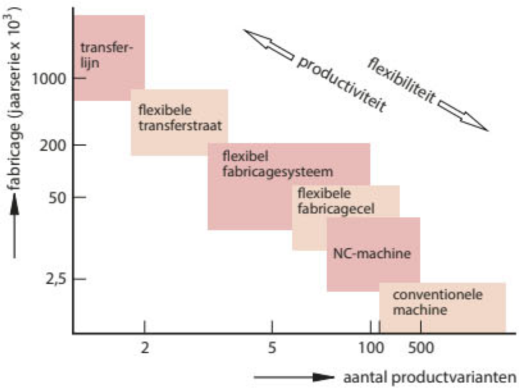


Figuur 15.8 Terugkoppeling van informatie tussen de verschillende besturingsniveaus

Om langdurige onderbrekingen van de goederenstroom te voorkomen dient de noodzakelijke informatie over de storing (plaats, oorzaak, geschatte duur) zo snel mogelijk beschikbaar te komen.

Het gebruik van teruggekoppelde informatie stimuleert de organisatie om de in het bedrijf aanwezige kennis vast te leggen, te structureren en toegankelijk te maken voor toekomstig gebruik (**formaliseren**). Het formaliseren van kennis is een eerste vereiste voor de automatisering van bedrijfsprocessen.
Gezien de enorme samengesteldheid van de te verwerken informatie is de behoefte aan automatische informatieverwerkende apparatuur groot. Vooral wanneer er sprake is van een groot aantal productvarianten en frequente wijzigingen in het productenpakket.

Een hoge flexibiliteit stelt hoge eisen aan de werkvoorbereiding, de capaciteitsplanning en de productiebesturing. Automatisering van de informatieverwerking op, en tussen, de verschillende niveaus is een voorwaarde om de flexibiliteit verder te kunnen verhogen. In het algemeen dient men een compromis te vinden tussen productiviteit en flexibiliteit. Hierbij is de seriegrootte van de producten de bepalende factor.
Figuur 15.9 geeft een overzicht van verschillende typen fabricagesystemen in relatie tot productiviteit en flexibiliteit.



Figuur 15.9 Productiviteit en flexibiliteit van fabricagesystemen

15.4 Goederenstroombesturing en werkplaatsbesturing

In deze paragraaf bespreken we de goederenstroombesturing en de werkplaatsbesturing. We lichten hiervoor allereerst de verschillende besturingsniveaus toe. Vervolgens vergelijken we voorraadgestuurde systemen en programmagestuurde systemen met elkaar. Daarna kijken we nog naar werkplaatsbesturing.

15.4.1 Besturingsniveaus

Het besturen van het productieproces vindt plaats op verschillende niveaus:
- strategisch niveau;
- ondernemingsplan;
- hoofdproductieplan;
- tactisch niveau;
- gedetailleerde materiaalbehoefteplanning;
- gedetailleerde capaciteitsbehoefteplanning;
- operationeel niveau;
- werkplaatsbesturing (weergegeven in figuur 15.14);
- gereedschapsvoorziening;
- materiaalvoorziening.

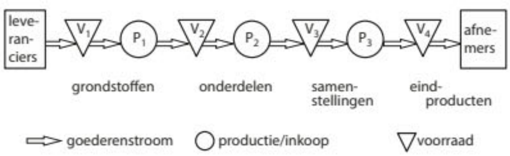
Van strategisch naar tactisch en vervolgens naar operationeel niveau neemt de mate van detaillering toe. De beschikbare tijd voor het nemen van beslissingen, het uitvoeren van taken, het signaleren van storingen en het reageren daarop neemt juist steeds verder af. Dit heeft uiteraard gevolgen voor de beheersing van de informatiestromen op en tussen de verschillende niveaus. Terugkoppeling van statusinformatie is noodzakelijk op ieder niveau. Deze terugkoppeling zorgt ervoor dat men slagvaardige beslissingen kan nemen en zo nodig alternatieven kan genereren. Voor het assembleren van eindproducten of componenten zijn grote aantallen onderdelen en subsamenstellingen nodig. Deze moeten op tijd aanwezig zijn om de assemblage ongestoord te kunnen laten verlopen. Dit laatste is een van de belangrijkste taken van de **goederenstroombesturing** of **logistieke besturing**.

Onderdelen en subsamenstellingen worden gewoonlijk in een hoger, soms zelfs veel hoger, tempo gefabriceerd dan de eindproducten; dit gebeurt in elkaar opvolgende fabricageseries. Onderdelen of componenten worden ook vaak geleverd door andere bedrijven. Na elke stap in het fabricageproces kan er sprake zijn van tussenopslag in voorraadpunten. De **fabricageketen** kan worden weergegeven door het schema in figuur 15.10. Deze figuur is niet van toepassing op de lijnproductie, omdat daarbij de achtereenvolgende stappen in een continue stroom plaatsvinden.

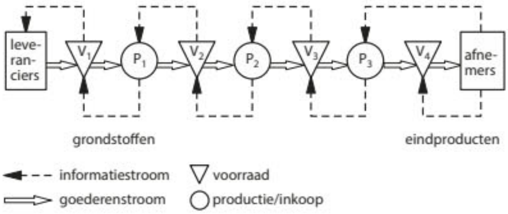
Op elk voorraadpunt moet men zorgen voor voldoende voorraad. Ter ondersteuning van de voorraadbeheersing bestaan er verschillende plannings- en besturingssystemen. De belangrijkste varianten hiervan zijn de voorraadgestuurde en de programmagestuurde systemen. Deze komen aan de orde in de volgende paragrafen.

15.4.2 Voorraadgestuurde systemen

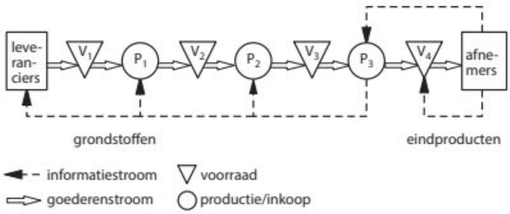
De traditionele manier van productiebesturing is gebaseerd op het per voorraadpunt bijhouden van de voorraden. De voorraadbeheerder bestelt volgens bepaalde regels wanneer de voorraad onder een bepaalde minimumwaarde, het **bestelniveau**, daalt. Hij houdt hierbij rekening met de prognose van het verbruik, de levertijd en de gunstigste seriegrootte. Om de gunstigste seriegrootte te bepalen, weegt hij de kosten per bestelling af tegen de kosten van aanwezige voorraden. Deze methode houdt rekening



Figuur 15.10 Fabricageketen met tussenopslag



Figuur 15.11 De goederen- en informatiestromen bij voorraadgestuurde systemen



Figuur 15.12 De goederen- en informatiestromen bij programmagestuurde systemen

met mogelijk optredende afwijkingen in verbruik en levertijd. Ze staat daarom bekend als **statistische voorraadbeheersing**. De bestellingen worden dus gestuurd door het verbruik. Men spreekt daarom ook wel van een **'pull'-systeem**. De goederen- en informatiestromen bij dit systeem hebben we weergegeven in figuur 15.11.

Een modern voorraadgestuurd systeem is gebaseerd op het leveren van producten kort voordat ze nodig zijn. De uitgangsmaterialen en componenten worden hierbij rechtstreeks geleverd op de fabricageafdeling of de montageafdeling. Er zijn dus geen tussenmagazijnen. Levering geschiedt in kleine hoeveelheden, soms diverse keren per dag. Deze methode staat bekend als **just in time (JIT)**. Zij maakt uiterst korte doorlooptijden, lage voorraadkosten en een snelle reactie op de marktvraag mogelijk. Om deze voordelen te kunnen behalen, moet echter wel aan de volgende voorwaarden zijn voldaan:

- een snelle en betrouwbare communicatie tussen gebruiker en leverancier;
- een zeer hoge flexibiliteit van interne en externe leveranciers;
- een hoge betrouwbaarheid ten aanzien van levertijd en kwaliteit, want vertraging of afkeur leidt onmiddellijk tot stagnatie;
- een redelijk constant productietempo.

15.4.3 Programmagestuurde systemen

De voorraadgestuurde systemen reageren op het waargenomen verbruik. Men kan echter ook uitgaan van bekende of verwachte leveringen van eindproducten en met behulp van deze gegevens de behoefte aan onderdelen en (sub)componenten vooraf berekenen. Dit is het principe van **MRP (material requirements planning)**.

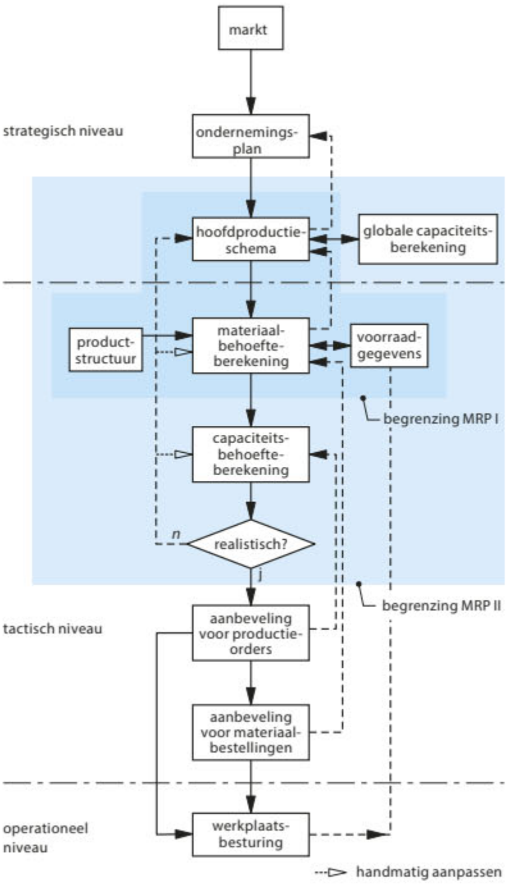
MRP I is ontstaan in de jaren '60 van de vorige eeuw. Het is een methode om voorraadproblemen op te lossen. De basis van elke planning is het **ondernemingsplan**. Op grond hiervan stelt men periodiek vast welke hoeveelheid eindproducten wanneer geproduceerd moet worden. Dit doet men op basis van de voorspelling van de afzet. Het resultaat is het **hoofdproductieplan (HPP)**. Deze activiteit vindt plaats op strategisch niveau.
De behoefte aan materialen voor de eindproducten volgt uit de **stuklijst**, waarin de productstructuur (zie paragraaf 11.3) is vastgelegd. Verdere invoergegevens zijn de **doorlooptijden** (levertijden), de aanwezige voorraden en de reeds lopende bestellingen. Met deze gegevens berekent MRP (terug in de tijd) wanneer deelassemblages, onderdelen en materialen moeten worden besteld. Op grond hiervan geeft het systeem inkoop-, fabricage- en montageorders uit. Wegens deze werkwijze wordt MRP een **'push'-systeem** genoemd. De goederen- en informatiestromen bij dit systeem hebben we weergegeven in figuur 15.12.

MRP I houdt op geen enkele wijze rekening met beschikbare capaciteiten. Vanwege de wens om de beheersbaarheid van productiesystemen te vergroten heeft men het MRP-concept uitgebreid tot **manufacturing resources planning (MRP II)**. MRP II ondersteunt in zekere mate de capaciteitsplanning.

Om de haalbaarheid qua capaciteit van het HPP te testen vindt eerst een globale capaciteitsberekening plaats. Dit kan leiden tot aanpassingen van het HPP. Na het uitvoeren van de materiaalbehoefteberekening volgens MRP I volgt een meer gedetailleerde capaciteitsbehoefteberekening. Naast de gegevens die men bij MRP I moet invoeren, moeten hiervoor de inricht- en stuktijden voor elke bewerkingsstap worden ingevoerd. Wanneer de berekende capaciteit de beschikbare capaciteit overtreft, is het plan niet realistisch en zijn er aanpassingen nodig. Doordat MRP II met vaste doorlooptijden rekent, kan het aanpassen slechts plaatsvinden door

'handmatige' tussenkomst van de materiaalplanners of door het aanpassen van het HPP. In het laatste geval zal uit een nieuwe behoefte- en capaciteitsberekening moeten blijken of de planning nu wel realistisch is. Dit deel van het proces speelt zich af op tactisch niveau.
De rekeneenheid in de planning is in veel gevallen een periode van een week; het benodigde rekenwerk voor het opstellen van een plan kan uren duren. De verdere detaillering vindt plaats op het operationele niveau.
In figuur 15.13 hebben we MRP I en MRP II samengevat.

Uit de vroegere MRP-pakketten zijn de **ERP-systemen** voortgekomen. ERP staat voor **enterprise resource planning** en wordt inmiddels veelvuldig gebruikt door grotere bedrijven. ERP is ontstaan door de besturing van de goederenstroom te integreren met de geldstroom. In vergelijking met MRP levert ERP een aanzienlijke bijdrage aan de verbetering van de beheersing van de logistiek. ERP-systemen bevatten computerprogrammatuur voor de besturing van meerdere bedrijfsprocessen, inclusief het financiële beheer, en zijn van belang voor de integrale bedrijfsvoering. Deze systemen vergen een uitgebreide IT-infrastructuur.



Figuur 15.13 Schematische voorstelling van MRP I en MRP II

15.4.4 Vergelijking van voorraad- en programmagestuurde systemen

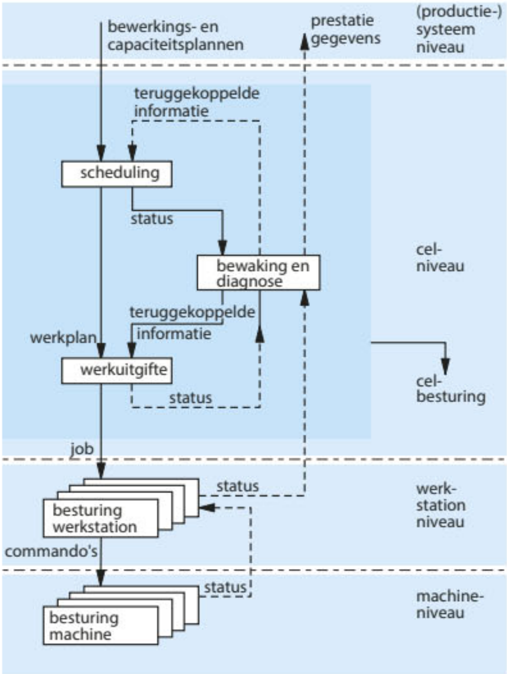
Bij voorraadgestuurde systemen wordt de besturing per voorraadpunt geregeld, dus decentraal.
Bij de traditionele statistisch gestuurde voorraadbesturingsmethode kan het stap voor stap en met vertraging doorstromen van de informatie leiden tot '**opslingering**'. Een kleine verandering in de afzet van eindproducten kan leiden tot grote variaties in de vraag naar tussenproducten en onderdelen. Als opslingering optreedt, is het fabricageproces onbeheersbaar.

Wanneer men voldoet aan de voorwaarden die we in paragraaf 15.4.2 hebben genoemd, is opslingering op te lossen met de JIT-bevoorradingsmethode (*just in time*). Door de zeer directe aansturing kan men ervoor zorgen dat alleen de werkelijk benodigde delen gefabriceerd of geassembleerd worden. Dit systeem wordt steeds meer toegepast, in de personenauto-industrie en in andere bedrijfstakken.

MRP I en MRP II zijn centralistische besturingssystemen. Dit houdt in dat alle informatie op een centraal punt beschikbaar moet zijn. In de praktijk levert de beperkte betrouwbaarheid van deze informatie vaak grote problemen op. Dergelijke systemen kunnen bovendien overmatig reageren op schommelingen in de vraag. Betrekkelijk kleine afwijkingen van de oorspronkelijke verwachtingen veroorzaken verschuivingen in de berekende besteldata. Dit is niet bevorderlijk voor de geloofwaardigheid van de gevraagde leverdata. Het is bij deze systemen absoluut noodzakelijk om met betrouwbare gegevens te werken. Dit vraagt om grote inspanningen.

15.4.5 Werkplaatsbesturing

Werkplaatsbesturing (*shop floor control*) bestaat uit het besturen van alle activiteiten die noodzakelijk zijn voor de feitelijke fabricage of assemblage van

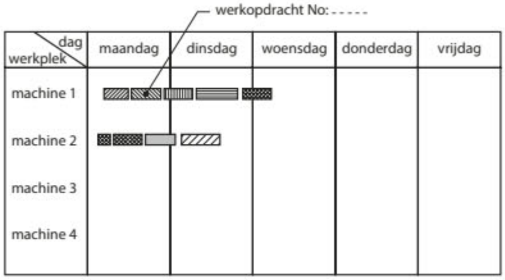


Figuur 15.14 Werkplaatsbesturing

producten (zie figuur 15.14). De werkplaatsbesturing regelt de gedetailleerde activiteiten op de korte termijn met betrekking tot de detailplanning, uitvoering en bewaking van alle bewerkingen. De werkplaatsbesturing regelt ook alle nevenactiviteiten, waaronder de voorziening van materialen en gereedschappen.

De invoer voor de werkplaatsbesturing bestaat uit een verzameling werkopdrachten voor de verschillende werkstations en de daarbij behorende bewerkingsplannen. Deze werkopdrachten moeten binnen een gegeven termijn worden uitgevoerd, bijvoorbeeld binnen een week. De werkplaatsbesturing rangschikt de opdrachten in een werkplan dat aangeeft wanneer en op welke machine elke opdracht moet worden uitgevoerd (zie figuur 15.15).

Het uitgeven van werkopdrachten vindt plaats op korte termijn, rekening houdend met de werkelijke beschikbaarheid van de geplande werkstations of machines. De effectiviteit van het functioneren van een werkplaatsbesturingssysteem kan worden gedefinieerd als het vermogen om alle uitgegeven werkopdrachten op tijd, efficiënt en tegen acceptabele kosten uit te voeren.



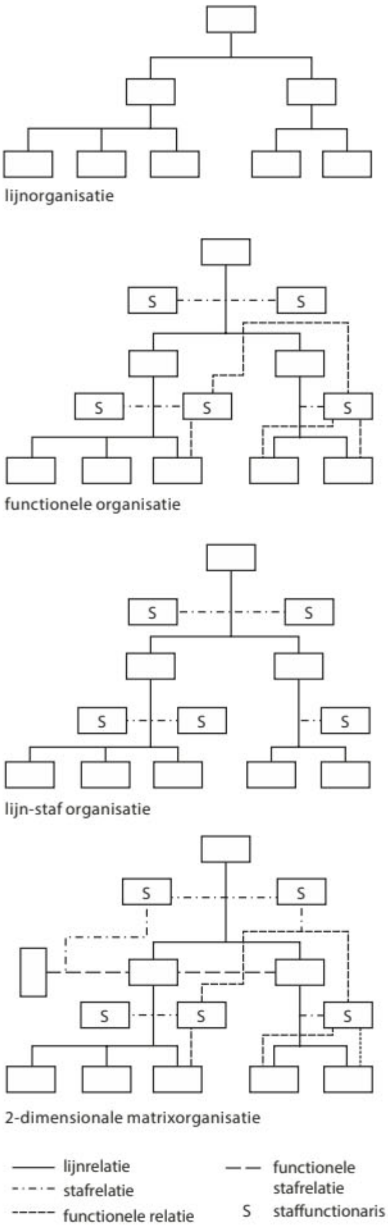
Figuur 15.15 Werkplan

Voor een storingsvrij verloop van de productie op de werkplaatsvloer is het van groot belang dat de werkuitgifte niet alleen gebaseerd is op de werkelijke beschikbaarheid van de machines, maar ook op die van de gereedschappen. De bewerkingsinstructies die worden meegegeven moeten foutloos zijn. Productieplanning op hogere niveaus dient de activiteiten op lagere niveaus aan te sturen, en dan met name de werkplaatsbesturing. Om snel te kunnen reageren op storingen moet de koppeling tussen de elkaar opvolgende planningsfuncties niet star zijn. Er moet ruimte (flexibiliteit) zijn om het werkplan aan te passen zonder dat er direct wijzigingen op een hoger planningsniveau nodig zijn. Een goede kwaliteitsbeheersing van de bewerkingsprocessen vormt samen met een goede informatie- en gereedschapsvoorziening de basis voor een storingsvrij verloop.
Werkplaatsbesturing in de kleinseriefabricage, en met name van eenmalige orders, wordt gekenmerkt door een zeer grote informatiedichtheid. Dit wordt veroorzaakt door het aantal orders dat tegelijkertijd in behandeling is, de complexiteit van de fabricagestructuur en de onzekerheid met betrekking tot orderroutes. Een productgerichte productiestructuur biedt de mogelijkheid om complexe en sterk wisselende orderroutes te beperken.

15.5 Organisatiestructuren

Binnen productiebedrijven kunnen organisatiestructuren op verschillende manieren worden ingedeeld. Allereerst op basis van de hiërarchie van leidinggeven (zie figuur 15.16), naar de wijze van het opsplitsen van de organisatie en naar het aantal niveaus van de hiërarchie. Deze categorieën kunnen we verder onderverdelen. We bespreken de verschillende structuren in deze paragraaf.

Op basis van de hiërarchie van leidinggeven:
- lijnorganisatie;
- lijn-staforganisatie;
- functionele organisatie;
- matrixorganisatie.



Figuur 15.16 Organisatiestructuren

Naar de wijze van het opsplitsen van de organisatie:
- procesgericht;
- productgericht;
- regionaal;

Naar het aantal niveaus van de hiërarchie.

15.5.1 Hiërarchische indeling

De oudst bekende structuur betreft de **lijnorganisatie**. Hierbij wordt uitgegaan van strikt hiërarchische verhoudingen tussen de leider en zijn ondergeschikten. De leider is bevoegd om ondergeschikten opdrachten te geven. Stilzwijgend gaat men ervan uit dat de ondergeschikte de plicht heeft de opdrachten uit te voeren. Iedere ondergeschikte heeft slechts met één baas te maken (eenhoofdige leiding).

De **lijn-staforganisatie** ontstaat uit een lijnorganisatie door toevoeging van een staf aan de leiding. Hier worden bepaalde werkzaamheden, werkzaamheden waarvoor specialistische kennis noodzakelijk is, door een of meerdere staffunctionarissen verzorgd. Staffunctionarissen hebben een adviserende, informerende en coördinerende bevoegdheid op dat specialistische gebied. De eenhoofdige beslissingsbevoegdheid van lijnfunctionarissen blijft gehandhaafd.

Voorbeelden van staffuncties zijn een afdeling fabricageontwikkeling die wordt toegevoegd aan de directeur fabricage of aan de chef van de fabricagevoorbereiding, en de afdeling personeelszaken. Stafafdelingen hebben geen rechtstreekse zeggenschap over de afdelingen waarvoor zij werken. Wanneer het voor lijnfunctionarissen steeds moeilijker wordt het werk van hun specialisten te beoordelen, worden adviezen van staffunctionarissen in feite instructies die formeel door de lijnfunctionarissen worden goedgekeurd. Doordat deze instructies een min of meer bindend karakter krijgen, vervaagt de beslissingsbevoegdheid van lijn- en staffunctionarissen en ontstaat een **functionele organisatie**. In de praktijk heeft iedereen dan te maken met verschillende bazen; de onderlinge verhoudingen worden moeilijker te doorzien.

Bij een **matrixorganisatie** wordt een aparte functionaris aangesteld voor de bewaking van de voortgang van de werkzaamheden op de verschillende afdelingen. Dit is meestal een stafmedewerker die de rol van projectleider vervult. Zijn werk heeft als

kenmerk dat het dwars door de hiërarchie van de organisatie gaat en dus niet de lijnstructuur volgt. Iedere werknemer heeft in de matrixorganisatie met twee chefs te maken. De aangestelde functionaris bepaalt welke werkzaamheden uitgevoerd moet worden en wanneer de uitvoering moet plaatsvinden. De lijnfunctionaris bepaalt hoe het werk moet worden uitgevoerd en vertegenwoordigt de belangen van de afdeling.

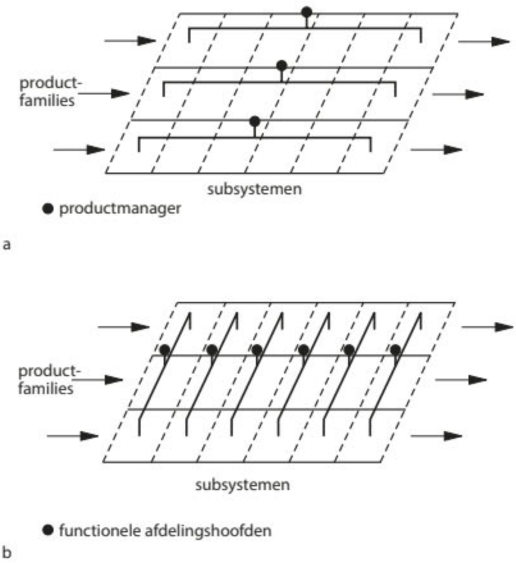
Deze werkwijze komt voor bij eenmalige activiteiten, zoals het ontwerpen van een chemische fabriek door een ingenieursbureau. Er wordt een projectgroep samengesteld uit medewerkers van verschillende afdelingen, ingedeeld naar specialisme, zoals procestechniek, werktuigbouw, elektrotechniek en regeltechniek. De dagelijkse leiding en coördinatie berust bij een projectleider. De leiding van de betreffende afdelingen blijft verantwoordelijk voor de kwaliteit van de technische oplossingen.

Een tweede activiteit waarin de matrixorganisatie voorkomt is de kwaliteitsbeheersing (zie ook hoofdstuk 12). Bij elk bedrijf, ook bij grotere bedrijven met een complexe organisatiestructuur, is de leiding op het hoogste niveau rechtstreeks verantwoordelijk voor de kwaliteit. Echter, vanwege de complexiteit kunnen organisatie, planning en voortgangsbewaking van het werk van de kwaliteitsafdeling niet vanaf het hoogste niveau worden gestuurd. Deze functies moeten daarom op het niveau van kleinere bedrijfseenheden worden vervuld. Een bedrijfsleider of afdelingsleider kan wel opdracht geven een bepaalde taak met voorrang te behandelen, maar mag nooit invloed uitoefenen op de beoordeling van het kwaliteitsniveau. Zo verschijnt hier dus weer de tweehoofdige leiding.

Naarmate een productiebedrijf groeit, wordt de organisatie steeds ingewikkelder. In het algemeen verandert de organisatie dan van een lijnorganisatie via de andere structuren die we hebben genoemd in een matrixorganisatie.

15.5.2 Indeling naar de opbouw van de productiestructuur

De organisatiestructuur kan ook worden afgestemd op het type productiestructuur (zie figuur 15.17). We bespreken hier de productgerichte organisatie, de procesgerichte organisatie en de geografisch gedeelde organisatie.



Figuur 15.17 Organisatiestructuren: productgericht (a), procesgericht (b)

Productgerichte organisatie

Bij massa- of grootseriefabricage in een lijnstructuur is sprake van een productgerichte organisatie. Er is één verantwoordelijke functionaris per productgroep, bijvoorbeeld scheerapparaten of een bepaald type automobiel (zie figuur 15.17a). Per productgroep vindt een afstemming plaats van alle subsystemen binnen het productiesysteem. Een dergelijke opsplitsing kan zeer ver gaan. Een automobielconcern kan bijvoorbeeld afzonderlijke lijnen hebben voor twee verschillende typen personenwagens waarin dezelfde motoren en dergelijke worden toegepast. Procesintegratie maakt het mogelijk meerdere productielijnen samen te voegen tot één **productplatform**. Dit is een samenstellingsstructuur voor het ontwerpen en samenstellen van een familie van verschillende producten. Deze producten probeert men te produceren met de kleinst mogelijke verzameling van productiemachines op basis van de grootst mogelijke verzameling van dezelfde onderdelen. Het platform vormt de overgang van de productgerichte organisatie naar de procesgerichte organisatie.

Procesgerichte organisatie

In de kleinseriefabricage (in machinefabrieken) is vaak sprake van een procesgerichte productiestruc-

tuur en een daarmee overeenkomende organisatie (zie figuur 15.17b). De tendens om ook bij de kleinseriefabricage over te gaan naar een productgerichte productiestructuur is natuurlijk ook terug te vinden in de organisatiestructuur. De redenen voor deze verandering hebben we besproken in paragraaf 15.2.

Geografisch gedeelde organisatie

Wanneer het contact met de afnemers een grote rol speelt, zoals bij handelsmaatschappijen, kan worden gekozen voor een opsplitsing naar regio. Grote multinationale bedrijven kennen soms zowel een productgerichte als een regionale opsplitsing van de organisatie. Dit kan leiden tot complexe matrixstructuren, die moeilijk te beheersen zijn.

15.5.3 Indeling naar aantal hiërarchische niveaus

Met het groeien van organisaties zal het aantal verschillende functies sterk toenemen en zal het beheersen van het proces steeds moeilijker worden. Dit leidt bijna onvermijdelijk tot het ontstaan van bureaucratische structuren met een groot aantal hiërarchische niveaus. Onverbrekelijk hiermee verbonden zijn lange communicatielijnen en trage besluitvorming.

Bedrijven trachten deze problemen te ondervangen door:
- Het verplaatsen van verantwoordelijkheden naar een zo laag mogelijk niveau in de hiërarchie, bijvoorbeeld door het instellen van autonome groepen. De productgerichte organisatiestructuur maakt het mogelijk de groepen zelf verantwoordelijk te maken voor planning en voortgangscontrole. Ook bevoegdheden voor de kwaliteitsbewaking worden voor een groot deel aan de groep overgedragen. Dit maakt het mogelijk het aantal besturingsniveaus te reduceren, wat leidt tot een **platte organisatie**.
- Het verkleinen en vereenvoudigen van de organisatie door zo veel mogelijk activiteiten uit te besteden. Alleen de **kernactiviteiten** worden in principe in het eigen bedrijf uitgevoerd; alle andere activiteiten komen voor uitbesteding in aanmerking. Kernactiviteiten zijn het ontwikkelen, verkopen en assembleren van eindproducten en het fabriceren van delen die essentieel zijn voor de functionele en technische kwaliteit van het product, zoals de scheerkoppen van het scheerapparaat. Ontwikkeling en fabricage van niet-kritische delen kan worden uitbesteed. Hiervoor worden duurzame samenwerkingsverbanden aangegaan met toeleveringsbedrijven. Deze werkwijze staat bekend als **co-makership**. In sommige industrietakken is het gebruikelijk tot 70% van de waarde van de eindproducten in te kopen. Dan spreekt men wel van **lean production**. Ook allerlei vormen van dienstverlening, zoals onderhoud van gebouwen en de exploitatie van het bedrijfsrestaurant, worden steeds vaker uitbesteed.

Met het begrip lean production wordt meer bedoeld dan alleen het uitbesteden van werk zoals het fabriceren van onderdelen. In zijn totaliteit is lean production gericht op:
- het concurreren in de markt op basis van kernactiviteiten, liefst gebaseerd op zelf ontwikkelde technologieën;
- het uitbesteden van werk dat sterk onderhevig is aan concurrentie op basis van kosten;
- het in eigen beheer houden van productieactiviteiten die een belangrijke invloed op de doorlooptijd van orders kunnen hebben.

15.6 Communicatie en informatiebeheer

De toegenomen globalisering van de markt en de daarmee samenhangende hevige concurrentie stellen hoge eisen aan de flexibiliteit van de productie en het aanpassingsvermogen (‘*agility*’) van bedrijven. De snelheid waarmee nieuwe producten op de markt kunnen worden gebracht, bepaalt in veel gevallen het verkoopsucces (denk hierbij bijvoorbeeld aan Apple). De afstand van de klant tot het bedrijf neemt af en er ontstaan zelfs directe communicatielijnen tussen klanten en bedrijven. Veel producten, ook consumentenproducten, worden geleverd op basis van individuele klantenwensen. De snelheid waarmee nieuwe producten elkaar op de markt afwisselen, noodzaakt bedrijven ook de ontwikkeling van nieuwe producten en productieprocessen steeds sneller uit te voeren (verkorting van de ‘*time to market*’).

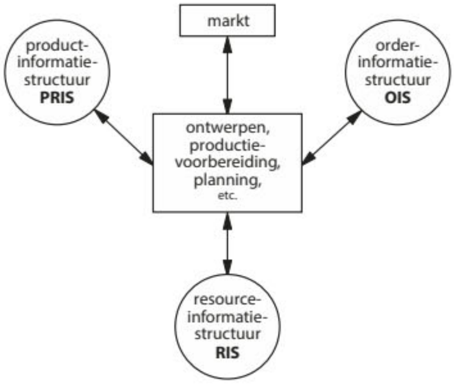
Om het aanpassingsvermogen te vergroten, beperken bedrijven zich steeds meer tot hun kernactiviteiten. Ook besluit men vaak productiebedrijven te verplaatsen naar landen met een lagere kostenstruc-

tuur, of naar die gebieden waar de grootste afname van de producten plaatsvindt. Door al deze ontwikkelingen neemt het aandeel van de toelevering van onderdelen, subassemblages en producten toe. Zo ontstaan er binnen bedrijven zogeheten '**businessunits**', die aan elkaar leveren op basis van een klant-leverancierverhouding. Een groep bedrijven of bedrijfsonderdelen die vanuit verschillende locaties in de wereld bijdragen aan één productiedoelstelling, wordt tegenwoordig ook wel een **virtuele fabriek** genoemd.

Tussen verschillende bedrijven ontstaan zoals gezegd vormen van co-makership. Co-makership onderscheidt zich van de normale toelevering door het feit dat ook een deel van de ontwerp- en 'engineering'-activiteiten (risicodragend) wordt uitbesteed. Ook binnen bedrijven worden taken die vroeger op één ontwerpafdeling werden uitgevoerd, steeds meer opgedeeld in projecten die door speciaal daarvoor samengestelde teams worden uitgevoerd. Men beoogt hiermee sneller en beter te kunnen ontwerpen, door meer gelijktijdigheid tussen de uitvoering van de diverse ontwerp- en engineeringstaken te bewerkstelligen (**concurrent engineering** of **simultaneous engineering**). De ontwikkelingen op het gebied van '**computer-supported collaborative work' (CSCW)** dragen hieraan bij. Hierdoor kunnen ontwerpers die zich op verschillende locaties in een bedrijf bevinden, of bij verschillende vestigingen of bedrijven verspreid over de wereld, als één team samenwerken. Dit wordt mogelijk gemaakt door het gebruik van speciale CAD/CAM-systemen, die aangesloten worden op breedbandcommunicatienetwerken.

Om een snelle en veelzijdige communicatie en navigatie mogelijk te maken, maakt men op grote schaal gebruik van **informatiestructuren**. Foutloos wijzigingenbeheer, terugzoeken en dergelijke zijn hierdoor ook mogelijk. De informatiestructuren dienen bijvoorbeeld ter ondersteuning van de opslag, representatie en de communicatie tussen ontwerpers onderling, tussen ontwerpers en CAD/CAM-systemen en tussen CAD/CAM-systemen onderling. Het productmodel kan hierbij op evolutionaire wijze tot stand komen. Het ontwerpen van productiemiddelen en fabricagesystemen kan op dezelfde manier in de ontwikkeling worden betrokken.

In figuur 15.18 geven we een conceptuele voorstelling van de integratie van ontwerp, engineering, productievoorbereiding en productieplanning. We gaan hierbij uit van een communicatieve infrastructuur bestaande uit de volgende drie toegespitste informatiestructuren:



Figuur 15.18 De belangrijkste informatiestructuren in een productiebedrijf

1. de productinformatiestructuur (PRIS) betreffende de gegevens van productfamilies waaruit nieuwe productontwerpen kunnen ontstaan;
2. de resource-informatiestructuur (RIS) betreffende de gegevens van beschikbare productiemiddelen;
3. de orderinformatiestructuur (OIS) betreffende de gegevens van klantenorders.

De OIS bevat alle gegevens over de gehele levensduur van een product (gegevens over orders, klanten, geleverde materialen en onderdelen, kosten, verkoopprijs, levering, onderhoud en zo nodig ontmanteling).

Figuur 15.18 geeft een trend weer van huidige ontwikkelingen. Dergelijke systemen zullen in de toekomst beschikbaar komen. Een productinformatiestructuur (PRIS) zal te zijner tijd de tegenwoordig toegepaste PDM-systemen vervangen (PDM staat voor *product data management*). In tegenstelling tot een PRIS, kunnen PDM-systemen pas operationeel worden ingezet wanneer het productmodel gereed is. PDM-systemen bieden dus zelf geen ondersteuning bij de uitvoering van ontwerp- en 'engineering'-processen.
Enigszins vergelijkbare ontwikkelingen op het gebied van communicatie en procesbeheersing, vinden bijvoorbeeld plaats in het kader van Application Protocol nr. 214 van de STEP-communicatiestandaard (*STandard Exchange Protocol*, ISO 10303). Dergelijke STEP-toepassingen zijn

vooral gericht op grootschalige productie en volgen een wat afwijkende filosofie. Het opvallendst is het ontbreken van niet-technische gegevens in de PRIS en van de functionaliteit van een OIS. Op deze toepassingen gaan we hier verder niet in.

Met behulp van de huidige ERP-software worden voorraadsystemen, bedrijfsadministratie en logistiek zo met elkaar verbonden dat alle betreffende informatie in het hele bedrijf voor iedere betrokken werknemer toegankelijk is. Vroeger had elke afdeling zijn eigen systeem en moest de data in elk systeem opnieuw ingevoerd worden. ERP-systemen moeten goed geïntegreerd zijn, waardoor slechts eenmalige opslag van gegevens nodig en mogelijk is. Zo kan een ingevoerde verkooporder door een ERP-systeem bijvoorbeeld worden verwerkt tot automatisch gegenereerde inkooporders en een automatisch geplande personeelsinzet.

15.7 Integratie, werkwijze en informatieondersteuning

Bij het ontwerpen van complexe producten en processen maakt men gebruik van een architectuur. Een **productarchitectuur** of **procesarchitectuur** is een conceptuele rangschikking van de functionele elementen naar fysieke modules. Men duidt hierbij aan op welke manier deze modules zijn samengebouwd en met elkaar samenwerken. De modules zijn in de regel hiërarchisch gerangschikt naar hun functionele samenhang en bevatten informatie op verschillende detailniveaus. Op basis van richtlijnen en ervaring stelt men een modulaire structuur op. Deze structuur wordt bijvoorbeeld gebruikt bij het opstellen van een productplatform en dient als uitgangspunt voor het ontwerpproces van een familie van producten en/of processen. Product- en procesmodules kunnen apart van elkaar worden ontworpen en gepresenteerd, zolang relaties en eigenschappen maar op elkaar worden afgestemd. Hetzelfde geldt uiteindelijk ook voor alle onderdelen. Alle functies, modulen en onderdelen kunnen, indien nodig, tot in detail geanalyseerd, ingevuld en gewijzigd worden. De onderlinge samenhang, zowel functioneel als constructief, mag daardoor echter niet worden verstoord. Zo ontstaat uiteindelijk een volledig geïntegreerd product- of procesmodel.

Bij de feitelijke uitvoering van het ontwerpproces moeten alle noodzakelijke gegevens in principe op afroep tot in detail beschikbaar zijn. Deze eis geldt voor ieder te onderscheiden niveau en wordt sterker benadrukt naarmate er meer computerondersteuning wordt toegepast. Computers werken immers snel, maar kunnen onbekende gegevens niet zelfstandig aanvullen. Als er gegevens ontbreken, stijgen de uitvoeringstijd en de kosten onevenredig. Voor een beheerst procesverloop is procesintegratie noodzakelijk. Voor procesintegratie is dan weer een goede integratie van informatiesystemen onontbeerlijk. Dit laatste vormt nog steeds een grote uitdaging. In de automobielindustrie probeert men bijvoorbeeld vele honderden informatiesystemen vanuit verschillende disciplines in een netwerk met elkaar te laten communiceren.

Het ondersteunen van een goede werkwijze tijdens het ontwerp is bij complexe producten een grote uitdaging waarvoor geen vaste regels bestaan. In de huidige praktijk maakt de ontwerper bij herhaling grote sprongen in het ontwerp. Hij doorkruist daarbij verschillende niveaus en deelgebieden van informatie. Hij onderzoekt samenhangende relaties, stemt de te kiezen eigenschappen op elkaar af en legt ze vast. Dat vereist een goed overzicht van het geheel en van de afzonderlijke deelgebieden. Navigatiehulp is daarbij uiterst nuttig, zo niet noodzakelijk. Een verkeerd gekozen element kan elders in het ontwerp voor grote problemen zorgen, waar men pas later achter komt. In dat geval moet het deelproces voor een tweede keer (of nog vaker) doorlopen worden om tot een goede afstemming te komen (zie ook hoofdstuk 16). De mens heeft het bijzondere scheppende vermogen om conceptueel (in gedachtemodellen) te kunnen denken, ook over complexe problemen. Maar hij kan niet tegelijkertijd de totale oplossing ervan in detail overzien. Computerhulpmiddelen zijn nodig voor communicatie en navigatie, en vooral voor simulatie. Als deze hulpmiddelen niet aanwezig zijn, is men aangewezen op iteraties. Dit zijn er soms heel veel, en de kans op fouten is dan ook groot. In het uiterste geval is men aangewezen op 'trial-and-error'. Hiermee is veel tijd en geld gemoeid. Daarom blijft er in dat geval weinig tijd en flexibiliteit over om naar betere oplossingen te zoeken.

Bij concurrent engineering streeft men een parallelle, integrale werkwijze na. Deze werkwijze vergt een directe en gelijktijdige toegang tot gegevens van verschillende detailniveaus en onderdelen van het ontwerp. Ook een goede toegang tot kennisbronnen is noodzakelijk. Zeker als meerdere ontwerpers bij

het project betrokken zijn, komen communicatie en samenwerking weer als belangrijke aspecten van het ontwerpen naar voren. Er moet voortdurend overlegd worden om een goede samenhang met de rest te behouden. De architectuur is daarbij een belangrijk communicatiemiddel dat de keuzeprocessen ondersteunt. Het is absoluut noodzakelijk dat de juiste samenhang tussen 'detail' en 'geheel' blijvend bewaakt wordt. Dit betekent ook dat relaties met eerder vastgelegde gegevens tijdens de verdere voortgang van het ontwerpproces niet verloren mogen gaan. Het is vaak ook nuttig om vast te leggen waarom men bepaalde keuzen heeft gemaakt. Indien in een later stadium dan blijkt dat een vroeger gemaakte keuze tot ongewenste consequenties leidt, kan de beslissing worden heroverwogen zonder dat men daarbij eerdere overwegingen over het hoofd ziet.

15.8 Het ontwerpen van productiesystemen

Voor het opzetten van een productiesysteem dienen verschillende activiteiten te worden uitgevoerd. We beperken ons hier tot de primaire technische systemen, zoals fabricage- en assemblagesystemen en laten de oprichting en inrichting van gebouwen, het opzetten van informatiesystemen en van een financieel systeem buiten beschouwing. Onder andere de volgende activiteiten moeten worden ondernomen:

- Strategische planning van product-marktcombinaties die in aanmerking komen.
- Opstellen van een langetermijnafzetprognose.
- Voorlopige keuze van productiemiddelen (machines, gereedschap, opslag- en transportmiddelen) en in te kopen grondstoffen.
- Schatting van benodigde kennis en personeel.
- Schatting van de vereiste specificaties en capaciteit van de benodigde productiemiddelen.
- Ontwerpen van een of meer geschikte processtructuren (alternatievenstudie).
- Keuze van het meest geschikte alternatief, indien mogelijk op basis van een voorlopige materiaalstroom- en doorlooptijdanalyse.
- Schatting van de kosten van inkoop, van de benodigde materialen en van de noodzakelijke investeringen.
- Uitwerking van een gedetailleerde lay-out en definitieve keuze van de te installeren productiemiddelen.
- Fysieke en technische installatie van het systeem.

Belangrijke doelstellingen bij het installeren van een productiesysteem zijn:

- Optimalisering van de totale procesketen, met als belangrijkste doel minimalisatie van wacht- en bewerkingstijden, dus van de doorlooptijd.
- Gunstige arbeidsomstandigheden en veiligheid.
- Minimalisering van opslag- en transporthandelingen van materialen.
- Minimalisering van het materiaalgebruik, en van de kosten van materiaalbehandeling, fabricage en assemblage.
- Systeemflexibiliteit met het oog op mogelijk noodzakelijke of gunstige aanpassingen, stijgende afzet, gunstiger inkoop en betere technologie.

We beperken ons hier tot de twee meest kenmerkende en veelvuldig toegepaste structuren van een productiesysteem, te onderscheiden naar massaproductie en serieproductie (zie paragraaf 15.2.2):

- De productgerichte lijnstructuur met vaste routing, die vooral bij massafabricage toegepast wordt. Hierbij moet een min of meer ononderbroken stroom van producten over alle bewerkingsplekken worden onderhouden, voor zover mogelijk zonder tussenopslag. De transportafstanden tussen de bewerkingsplekken zijn in de regel zeer kort. Omdat het productievolume groot is, zijn de productiemiddelen specifiek van aard. De productie is programma- of voorraadgestuurd ('push'- of 'pull'- systeem) en gaat uit van een bekende (verwachte) vraag (zie paragraaf 15.4.2).
- De productgerichte groepsstructuur, die wordt toegepast bij serieproductie. De toepassing van deze structuur is vooral gestimuleerd door de ontwikkeling van flexibele automatisering met behulp van CNC-bestuurde gereedschapswerktuigen. De productvariatie en seriegrootte kunnen zeer verschillend zijn, en vooral de productvariatie is bepalend voor het kiezen van de kleinst mogelijke verzameling van de benodigde diversiteit aan werktuigen en ondersteunende apparatuur. Het aantal, de samenstelling en de lokalisering van de groepen worden vooral bepaald door de te onderscheiden productgroepen. Bij mogelijke productroutes door verschillende groepen spelen de gewenste routing en opslag (binnen en tussen de groepen) echter ook een rol.

Voor het sturen van de order- en materiaalstromen moet men kunnen beschikken over logistieke besturingssystemen (zie paragraaf 15.4). Op deze besturingssystemen gaan we hier verder niet in.

Wijzigingen in fabricage- en assemblagesystemen vragen vaak om aanpassingen van de betrokken informatiesystemen.

Bij het ontwerpen van een productiesysteem gaat men uit van de verzameling te fabriceren en te assembleren onderdelen en subsamenstellingen. Deze zijn vastgelegd in een gedetailleerd productontwerp en kunnen worden ingedeeld in zelf te produceren producten en in te kopen producten (make-or-buy, zie paragraaf 14.3.1).

Het is belangrijk dat een productiesysteem een juiste inrichting heeft met geschikte productiemiddelen, zoals machines, gereedschappen, middelen van transport en mensen (operators). Tot de gewenste uitvoeringsvorm van een productiesysteem behoort echter ook de ordening (**lay-out**) van de productiemiddelen tot een keten die is afgestemd op de gewenste productenstromen.
Deze ordening presenteren we hier als onderdeel van een procesbeschrijvende structuur. Ze moet een efficiënte stroom van orders, onderdelen en daaruit opgebouwde subsamenstellingen mogelijk maken. Hierbij moet men efficiënt gebruik kunnen maken van de beschikbare productiemiddelen en ruimten. De structuur vormt de grondslag voor de logistieke besturing (zie paragraaf 15.4.1).

Het ontwerpproces dat we hierna beschrijven geldt overwegend voor een productgeoriënteerde structuur of lijnstructuur.
De fabricage- en assemblagesystemen brengen de producten feitelijk voort. Men inventariseert alle benodigde fabricage- en assemblagestappen, zodat men een efficiënte planning en besturing van de productie kan realiseren. Op basis hiervan kiest men de belangrijkste specificaties van de benodigde bewerkingsmachines, assemblagewerktuigen en transportsystemen. Vervolgens bestudeert men een of meer mogelijke lay-outschema's. Men moet hierbij rekening houden met de beschikbare ruimten. Men ontwerpt gunstige stroomschema's en berekent de daarbij behorende doorlooptijden. Hieruit volgen de meest geschikte lay-out, de eisen waaraan de volumecapaciteiten van de verschillende productiemiddelen moeten voldoen en – zo mogelijk – hoe deze op elkaar moeten worden afgestemd. Het mag duidelijk zijn dat verscheidenheid en aantallen van de te produceren onderdelen en subsamenstellingen een zeer belangrijke rol spelen bij het ontwerpen van fabricage- en assemblagesystemen.

De invulling en samenstelling van fabricage- en assemblagesystemen zijn van primair belang voor het kunnen behalen van de doelstellingen van de geformuleerde productieopdrachten. Qua kosten moeten ze echter ook voldoen aan de winstdoelstelling van een bedrijf. Het streven naar 'lean production' (zie paragraaf 15.5.3) vergt een strategische aanpak van de make-or-buy-beslissingen. Men kiest vooral voor zelf te fabriceren en te assembleren onderdelen die een hoge toegevoegde waarde vertegenwoordigen. De keuze hangt samen met het eigen bezit van bijzondere kennis, vaardigheden en productiemiddelen. Bij de keuze van de uit te besteden fabricageopdrachten speelt de bezetting van het eigen productiesysteem een belangrijke rol, naast kwaliteit, leverbetrouwbaarheid en de kosten ervan.

Uitgaande van de functies en de capaciteit die het eigen productiesysteem moet gaan vervullen, worden de noodzakelijke productiemiddelen gekozen. Gaat men uit van een grotendeels al bestaand productiesysteem, dan heeft men te maken met beperkingen van al aanwezige en mogelijk geschikte productiemiddelen. Deze beperkingen kunnen de keuzen beïnvloeden en verdienen bijzondere aandacht, omdat het opheffen ervan gepaard gaat met extra investeringen.

Bijna iedere onderneming krijgt geregeld te maken met het probleem van het (opnieuw) ordenen, plaatsen en (wanneer nodig) aanschaffen van nieuwe productiemiddelen. Dit probleem kan allerlei oorzaken hebben. Het kan allereerst worden veroorzaakt door veranderingen in de markt die leiden tot wijzigingen in productassortiment, productontwerp en afzetvolume. Denk aan veranderingen die worden bepaald door de '*life cycle*' en prijs van het product, maar ook aan veranderingen door marktgroei of recessie. Er kunnen nieuwe fabricage- en assemblagetechnologieën, transportmiddelen, automatiseringsmethoden en dergelijke beschikbaar komen. De markt bepaalt uiteindelijk welke extra investeringen in productiemiddelen en inrichting men zich kan veroorloven. Het is dus erg belangrijk om al in het beginstadium van het ontwerpen van een productiesysteem zo goed mogelijk rekening te houden met mogelijk te verwachten veranderende omstandigheden.

Het ontwerpen van de lay-out van een productiesysteem verloopt volgens een iteratief proces, zowel in kwalitatieve als in kwantitatieve zin. Een ontwerp-

verandering kan betrekking hebben op het creëren van een compleet nieuwe ruimtelijke indeling, op het aanpassen daarvan, maar ook op het verbeteren van afstemming- en transportmogelijkheden in bestaande situaties. In het eerste geval is het ontwerp eenmalig en ingrijpend van aard, en vereist het een langetermijnvisie. In de andere gevallen is het minder ingrijpend, maar vindt het geregeld plaats, zij het meestal slechts gericht op een kortere-termijndoelstelling.

Het ontwerpen van een productiesysteem moet duidelijk systematisch en planmatig worden aangepakt. Dit is van groot belang om fouten te voorkomen die leiden tot tijdsverlies en productuitval bij het realiseren en opstarten van de productie. Stilstand van geïnstalleerde productiemiddelen is erg kostbaar en het tijdig op de markt brengen van nieuwe producten is een belangrijke voorwaarde voor het succes ervan.

Samenvatting

De omgeving waarin een bedrijf functioneert, de markt en de maatschappij, is aan sterke veranderingen onderhevig. Om te overleven moeten bedrijven zich kunnen aanpassen aan de omstandigheden. Het vermogen hiertoe wordt aangeduid met het begrip flexibiliteit.
Bedrijven zijn in te delen naar de mate waarin klantenorders het productieproces sturen, de aantallen waarin de producten worden vervaardigd, de plaats in de totale bedrijfskolom en de organisatiestructuur. Deze factoren bepalen in hoge mate de opzet van het productiesysteem.

De kleinseriefabricage is vooral van toepassing op de voortbrenging van hoogwaardige machines en apparatuur. De ontwikkeling van dit fabricagetype is voor een belangrijk deel gericht op het verhogen van de flexibiliteit met behoud van een goede efficiency. De voornaamste voorwaarden om dit te bereiken zijn korte omsteltijden om het fabriceren van kleine series economisch mogelijk te maken en het verkorten van de doorlooptijd door het realiseren van een productgebonden fabricagestructuur. Groepentechnologie is een hulpmiddel voor het vormen van productgroepen.

Voor een goede goederenstroombesturing is een goede beheersing van de informatiestroom nodig. Een goede terugkoppeling van gegevens van de werkelijke voortgang in de diverse onderdelen van het productieproces naar de planning is hierbij onmisbaar. We hebben een onderscheid gemaakt tussen voorraadgestuurde en programmagestuurde systemen. Voorraadgestuurde systemen werken decentraal en reageren op het verloop van de aanwezige voorraden. Programmagestuurde systemen berusten op de bekende of verwachte afzet van eindproducten en berekenen op basis daarvan de benodigde materialen als functie van de tijd. Dit principe staat bekend als MRP. De werkplaatsbesturing verzorgt de productiebesturing op het uitvoerende niveau.

Organisatiestructuren zijn te onderscheiden naar de opbouw van de hiërarchische structuur, de wijze van het opsplitsen van de organisatie en het aantal niveaus in de hiërarchie.
Typische organisatiestructuren zijn de lijnorganisatie en de functionele organisatie. Een bijzondere functionele organisatie is de matrixorganisatie.

Een andere belangrijke doorsnijding is die van de product- en de procesgerichte organisatiestructuren. Reductie van het aantal hiërarchische bestuursniveaus leidt tot een platte organisatie en een eenvoudiger communicatie. Dit bevordert de beheersbaarheid.

Wereldwijde marktwerking dwingt bedrijven zich steeds sneller aan te passen aan de veranderende wensen van de klant. Zij beperken zich steeds tot hun kernactiviteiten. Toelevering, co-makership en gespreide vestiging van onderdelen van bedrijven spelen een belangrijke rol bij de beheersing van het aanpassingsvermogen en van de productiekosten. Dit stelt hoge eisen aan de integratie van de gehele bedrijfsvoering, waarbij communicatie en kennis- en informatiebeheer sleutelrollen vervullen.

Literatuur

15.1 Goldratt, E.M., Cox, J. *Het Doel*, Het Spectrum, 2013, 34e druk, ISBN 978-90-003-376-44.

15.2 Hopp, W.J., Spearman, M.L., *Factory Physics*, 3rd ed., MacGraw Hill/Irwin, 2007, ISBN 978-0-0-282403-2.

15.3 Chase, R. B., N. J. Aquilano, and F. R. Jacobs. *Operations Management for Competitive Advantage*. 12th ed., McGraw-Hill/Irwin, 2009, ISBN 978-0-07-340329-8.

15.4 Lutters, D., *Informatieverwerking tijdens de product-levencyclus*, De Constructeur, Samson Bedrijfsinformatie bv, Part 1: Vol. 38, No. 4, pp. 52-56, Part 2: Vol. 38, No. 5, pp. 40-43, 1999, ISSN 0010-6658.

Oefenvragen

15.1 Wat is de zin van een systeembeschouwing van een productiebedrijf?

15.2 Wat is een aspectsysteem en hoe verhoudt een dergelijk systeem zich tot de rest van het beschouwde systeem?

15.3 Waarom is capaciteitsplanning op werkplaatsniveau bij massafabricage veel minder bewerkelijk dan bij kleinseriefabricage?

15.4 Wat is het voordeel van het produceren op order in vergelijking met het produceren op voorraad?

15.5 Noem de belangrijkste aspecten van lean production.

15.6 Wat is een productarchitectuur en welke functie heeft een productarchitectuur? Beschrijf de relatie tussen de productarchitectuur en procesintegratie.

inclusief website!

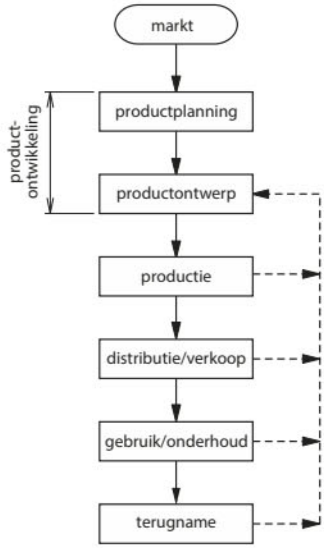
Op www.industrieleproductie.nl vind je de antwoorden op deze vragen, maar ook extra studie- en oefenmateriaal, zoals video's en meer opgaven.

16 Product- en productiegericht ontwerpen

In dit hoofdstuk geven we een beschrijving van het productontwikkelingsproces en bespreken we het belang van productiegericht ontwerpen.
We geven een aantal methoden en regels voor productiegericht ontwerpen.
We sluiten het hoofdstuk af met twee vereenvoudigde voorbeelden voor de keuze van materiaal en productieproces.

16.1 Inleiding

In de voorgaande hoofdstukken zijn we ingegaan op productietechnieken en -middelen. Deze worden gebruikt om producten te vervaardigen die in een bepaalde behoefte van de markt voorzien. Hieraan gaat echter nog een proces vooraf, namelijk het vertalen van een marktbehoefte in een productspecificatie en het omzetten daarvan in een productontwerp. Dit proces noemen we **productontwikkeling**. Omdat tijdens het ontwerpen van een product voor een aanzienlijk deel (impliciet) wordt bepaald hoe het product gemaakt kan worden, is het van groot belang al in de fase van het productontwerp rekening te houden met het fabriceren en monteren van het product. Hoe dit gerealiseerd kan worden, bespreken we in dit hoofdstuk. We kijken daarbij ook naar de keuzeproblematiek die daarmee samenhangt.



Figuur 16.1 De levenscyclus van een product

16.2 Productontwikkeling

Zoals we al zeiden in hoofdstuk 1, een van de hoofdfuncties van een zelfscheppende onderneming is de productontwikkeling. Productontwikkeling is het traject waarin een eerste idee voor een product stap voor stap ontwikkeld wordt tot een verkoopbaar product. Hierbij wordt ook aandacht besteed aan aspecten van de levenscyclus, zoals fabricage, onderhoud en terugname. Het omvat de productplanning en het productontwerpen (zie figuur 16.1). Bij de **productplanning** signaleert men behoeften van de markt en genereert men ideeën en concepten voor nieuwe generaties producten. Bij het **productontwerp** gaat het om het uitwerken van concepten tot producten, tot gedetailleerde ontwerpen van producten.

Het uitgangspunt voor productplanning is de markt; het heeft geen zin producten voort te brengen waar geen vraag naar zal zijn. In de productplanningsfase wordt op grond van de marktbehoefte vastgelegd op welk moment een bedrijf met welke producten de markt zal betreden. In deze fase worden de gegevens vastgelegd over de eigenschappen van het product, de verwachte productaantallen en de doelprijsstelling. Voor het maken van een realistische specificatie zou eigenlijk al een eerste versie van het conceptontwerp beschikbaar moeten zijn, maar tegelijkertijd bepaalt de uitkomst van de productplanningsfase mede de eisen aan dat **conceptontwerp**. Productplanning is primair een taak van de marketingafdeling.

De gegevens die tijdens de productplanning worden vastgelegd, vormen het startpunt voor het productontwerp. In deze fase wordt een **gedetailleerd ontwerp** gemaakt van het te vervaardigen product. Dit ontwerp wordt vastgelegd in productmodellen en technische tekeningen. Het ontwerp geeft informatie over de vorm en afmetingen van de onderdelen van het product en over de toegepaste materialen en bewerkingsprocessen. Dit bepaalt in hoge mate hoe de onderdelen moeten worden vervaardigd en vervolgens samengesteld tot een eindproduct. Om die reden is het van belang al tijdens het ontwerpen van het product rekening te houden met de manier waarop het product vervaardigd zal worden.

In het algemeen kan het product niet ontworpen worden zonder de nog komende fasen van de **levenscyclus** van het product bij het ontwerpen te betrekken. De levenscyclus van een product begint met de productontwikkeling. De volgende fasen zijn productie, distributie/verkoop, gebruik/onderhoud, en ten slotte de terugname uit de markt (zie figuur 16.1). Zo kunnen bijvoorbeeld onderdelen van het product die aan slijtage onderhevig zijn op een eenvoudig (de)monteerbare plaats binnen het product worden gepositioneerd met het oog op onderhoud.

Tegenwoordig houdt men steeds meer rekening met de terugname uit de markt. Aan het eind van de levensduur van het product zijn er drie mogelijkheden voor het verwerken van het product of delen daarvan.
De minst duurzame mogelijkheid is om het product geheel als afval af te voeren.
Een gunstiger mogelijkheid is het hergebruik van het materiaal. De ontwerper dient hierop in te spelen door het scheiden van onderdelen van verschillend materiaal mogelijk te maken (**Design For Recycling**). Gegalvaniseerde onderdelen zijn bijvoorbeeld vanuit milieuoogpunt nadelig. De gunstigste vorm van recycling is het hergebruik van samenstellingen en onderdelen, eventueel na revisie (**Design For Reuse**). Vaak zullen bepaalde delen van het product nog bruikbaar zijn, hoewel het product als geheel zijn functie niet meer kan vervullen. De ontwerper moet ervoor zorgen dat die onderdelen eenvoudig gedemonteerd kunnen worden zonder dat ze ernstig beschadigen. Dit geldt vooral voor niet of slechts beperkt aan slijtage onderhevige delen, zoals de benzinetank van een auto.

In het vervolg van dit hoofdstuk gaan we in op de relatie tussen productontwerp en productie.

16.3 Productontwerp en productie

In deze paragraaf definiëren we productiegericht ontwerpen en bespreken we grootheden om een ontwerp te beoordelen.

16.3.1 Definitie en belang van productiegericht ontwerpen

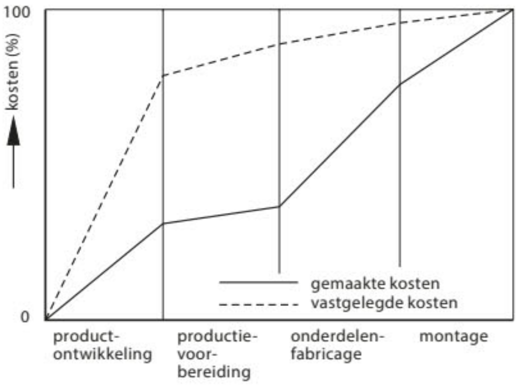
Productiegericht ontwerpen heeft als doel het ontwerp zo goed mogelijk af te stemmen op de fabricage- en montagemogelijkheden. Het te ontwerpen product moet niet alleen aan de functionele eisen voldoen (dus aan datgene wat de klant verlangt), maar moet ook tegen een aanvaardbare inspanning goed te realiseren zijn.

Binnen het productiegericht ontwerpen *(Design For Production,* **DFP)** kunnen we nog onderscheid maken tussen:
- **fabricagegericht ontwerpen** (*design for manufacturing*, **DFM**);
- **assemblagegericht ontwerpen** (*design for assembly*, **DFA**);
- **logistiekgericht ontwerpen** (*design for logistics*, **DFL**).

Logistiek zoals bedoeld in logistiekgericht ontwerpen betreft de productielogistiek. De productielogistiek draait om materiaalstromen in het bedrijf: opslag en transport van materialen, inkoopdelen, onderdelen, samengestelde producten en gereedschappen. Logistiekgericht ontwerpen is nauw verwant aan fabricagegericht en assemblagegericht ontwerpen.

Productiegericht ontwerpen heeft als doel het productontwerp te optimaliseren met betrekking tot criteria als technische mogelijkheden van de fabricagetechnieken, doorlooptijd en kosten. De toepassing van deze technieken verbetert in de regel ook de productkwaliteit.

Het productontwerp staat aan het begin van de levenscyclus van een product. Het valt daarom te verwachten dat beslissingen die in die fase genomen worden van grote invloed zullen zijn op de volgende fasen van de levenscyclus. Dit wordt



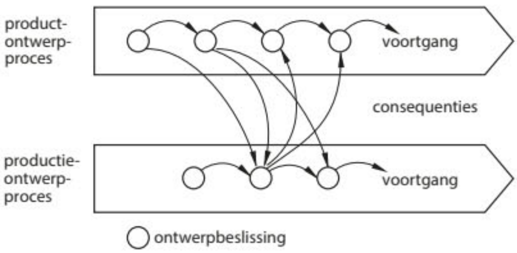
Figuur 16.2 Schematisch verloop van de vastgelegde en de gemaakte kosten als functie van de activiteiten in de voortbrengingsketen

geïllustreerd in figuur 16.2 (gelijk aan figuur 1.6). Uit deze figuur blijkt dat het ontwerpen zelf niet de hoogste kosten veroorzaakt, maar wel het grootste deel (tot 80%) van de productkosten vastlegt. Anderzijds blijkt uit de figuur dat bij de fabricage en de montage de daadwerkelijk gemaakte kosten verreweg het hoogst zijn.

Het ontwerp dient zo vroeg mogelijk in het ontwerpproces te worden afgestemd op de productie. Dit geldt zeker voor producten die in grote batches of in massa gefabriceerd worden. In deze fase kan de ontwerper nog gemakkelijk wijzigingen aanbrengen. De kosten van een wijziging zijn dan vaak nog laag. Dit verandert naarmate het ontwerp verder is uitgewerkt. Wijzigingen zijn dan niet meer zo gemakkelijk door te voeren, omdat het ontwerp het resultaat is van vele afwegingen. De kosten van het doorvoeren van een wijziging zijn dan hoog. Zeker als er al machines en gereedschappen zijn aangeschaft en de fabriek is ingericht.

De kern van productiegericht ontwerpen is zoals gezegd het afstemmen van het productontwerp op de mogelijkheden van de productie. In figuur 16.3 zie je in meer detail wat we hiermee bedoelen.

Het ontwerpproces van een product kan gezien worden als het voortdurend nemen van beslissingen, bijvoorbeeld over functionaliteit, delingen tussen onderdelen, materiaal, geometrie, afmetingen en toleranties. Genomen beslissingen in het productontwerp hebben direct consequenties voor (het ontwerp van) de productie en beperken de keuzemogelijkheden ervan. Andersom geldt hetzelfde: als het ontwerp van de productie deels vastligt, bijvoorbeeld in termen van machines en gereedschappen, gelden deze als randvoorwaarden en moet hier bij het ontwerpen van het product rekening mee worden gehouden (zie ook paragraaf 16.5).



Figuur 16.3 Conceptueel model van het onderling afstemmen van het productontwerp en het ontwerp van het productieproces

Het is nuttig om hierbij onderscheid te maken tussen kleinseriefabricage en grootserie- of massafabricage. In het geval van kleinseriefabricage van onderdelen zullen op de werkvloer in het algemeen generiek inzetbare machines staan, zoals bewerkingscentra en buigmachines. Deze machines hebben een grote algemene inzetbaarheid en bieden veel flexibiliteit.
De productontwerpers dienen op de hoogte te zijn van de mogelijkheden en beperkingen van de fabricage, en dienen hun ontwerp daar in het algemeen op aan te passen. Bij grootserie- en massafabricage zullen er vaker speciale gereedschappen en machines worden ontworpen en gerealiseerd voor het produceren van een product. Soms worden er zelfs volledig gespecialiseerde productielijnen opgezet. In dat geval wordt het product tegelijkertijd en in sterke samenhang met de productie ontworpen. Optimalisatie van het ontwerp is dan een complex samenspel van productontwerp én productieontwerp.

Figuur 16.4 illustreert dat het ontwerpen van het product, het ontwerpen van de productiemiddelen en het inrichten van de productie in onderlinge samenhang – en dus zo veel mogelijk gelijktijdig, overlappend – moet verlopen. Als de volgende activiteit pas start als de voorgaande volledig is afgerond (sequentieel verloop), is er sprake van lange terugkoppellussen naar de ontwerper. Zaken kunnen dan nog maar beperkt worden aangepast, en dit is bovendien kostbaar. Het wordt dan moeilijk om

een overschrijding van het budget en de levertijd te voorkomen. Onder tijdsdruk moet dan vaak besloten worden het ontwerp maar te laten voor wat het is en genoegen te nemen met een minder gunstig productieproces.

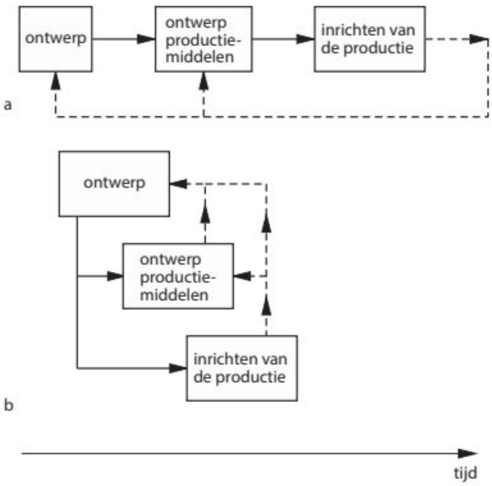
Bij de overlappende werkwijze, ook wel aangeduid met de term **concurrent engineering**, treden deze gevaren veel minder op. Dit komt doordat de terugkoppellussen hierbij korter zijn. Als gevolg van de kortere totale ontwikkeltijd kan het product eerder op de markt verschijnen. Dit kan een zeer belangrijk concurrentievoordeel opleveren.

Om deze manier van werken te kunnen realiseren, zijn ingrijpende organisatorische veranderingen noodzakelijk. Een scheiding van het ontwerpen, de productievoorbereiding en het ontwerpen van productiemiddelen moet worden voorkomen. Daarvoor is een goede communicatie tussen deze activiteiten onmisbaar. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren in de vorm van **design reviews**, waarbij deskundigen van verschillende disciplines met elkaar om tafel gaan zitten om de verschillende aspecten van een ontwerp te beoordelen. Een oplossing die nog verder gaat is het vormen van multidisciplinaire teams of **design build teams**. Een dergelijk team pakt gezamenlijk een compleet project aan.

Een andere voorwaarde voor een goed verlopend ontwikkelingsproces is dat alle betrokkenen steeds over dezelfde, meest recente informatie kunnen beschikken. **Productconfiguratie-beheerssystemen** zijn hierbij een belangrijk hulpmiddel. In zo'n systeem wordt voortdurend bijgehouden wat de status (geldigheid) is van de afzonderlijke ontwerpdocumenten, welke wijzigingen worden toegelaten enzovoort. Het systeem zorgt er ook voor dat belangrijke handelingen, zoals wijzigen en goedkeuren van het ontwerp, alleen door bevoegde personen kunnen worden verricht.

16.3.2 Beoordelingsgrootheden

Tijdens het ontwerpproces moet het ontwerp meerdere keren worden beoordeeld. Belangrijke aspecten hierbij zijn:
- functievervulling;
- maakbaarheid;
- onderhoudbaarheid;
- duurzaamheid.



Figuur 16.4 Sequentieel (a) versus overlappend (b) uitvoeren van het ontwerp- en voortbrengingstraject

Om deze aspecten te kunnen beoordelen, zijn beoordelingsgrootheden en evaluatieprocedures nodig. Voorbeelden van beoordelingsgrootheden zijn maakbaarheid, betrouwbaarheid, capaciteitsbeslag, complexiteit, kosten en tijd.

Bij **maakbaarheid** gaat het om het opsporen van vormelementen die niet of moeilijk zijn te realiseren met de beschikbare technieken, en met de aanwezige machines en gereedschappen. Enkele voorbeelden: met gieten in zandvormen kunnen geen nauwe toleranties worden gehaald; er is dan een nabewerking nodig. Bij boorbewerkingen moet de ontwerper rekening houden met de in het bedrijf gangbare boordiameters; hij moet geen gat voorschrijven met een diameter van 5 of 7 mm wanneer gaten van 6 mm gangbaar zijn.

De **betrouwbaarheid** van processen hangt in belangrijke mate af van de staat van ontwikkeling van de processen en de ervaring die het bedrijf daarmee heeft opgebouwd. Men kan er eventueel voor kiezen om bepaalde processen uit te besteden aan gespecialiseerde toeleveranciers die wel over de vereiste kennis en ervaring beschikken.

Iedere uit te voeren bewerking legt beslag op de beschikbare capaciteit. Een schatting van het **capaciteitsbeslag** dat een bepaald ontwerp veroorzaakt, kan leiden tot een beslissing om de capaciteit uit te breiden of om werk uit te besteden.

Als maatstaf voor de **complexiteit** kunnen onder meer de volgende kenmerken worden gebruikt:
- het aantal verschillende bewerkingen dat bij de vervaardiging van een onderdeel moet worden uitgevoerd;
- het aantal benodigde opspanningen;
- de complexiteit van de afzonderlijke handelingen;
- het aantal te monteren onderdelen.

In het algemeen leidt een hogere complexiteit tot hogere kosten en een langer tijdsduur van het voortbrengingsproces.

De kosten die verbonden zijn met de vervaardiging van een product vormen een van de belangrijkste beoordelingsgrootheden. Gedurende het hele ontwerptraject moeten kostenschattingen en -berekeningen gemaakt worden.

De tijd die nodig is om onderdelen te vervaardigen en samen te voegen tot een product is onder meer van belang voor het schatten van de benodigde productiecapaciteit. De doorlooptijd wordt overwegend bepaald door het aantal bewerkingsstappen en slechts in geringe mate door de bewerkingstijden zelf; dit is een gevolg van de lange wachttijden tussen de bewerkingsstappen.

Afhankelijk van de productieomgeving en het toepassingsgebied kunnen ook nog andere specifieke maatstaven gehanteerd worden. Wanneer automatische montage wordt nagestreefd, kan bijvoorbeeld het percentage automatisch monteerbare onderdelen als maatstaf gelden. Een ander voorbeeld van een specifieke maatstaf is het aantal delingen en het aantal kernen dat nodig is om een gietproduct te vervaardigen.

Een deel van deze beoordelingsgrootheden is in principe kwantificeerbaar. Dat geldt bijvoorbeeld voor kosten en tijd. Over andere grootheden, zoals betrouwbaarheid, zijn vaak alleen kwalitatieve uitspraken mogelijk. Naast beoordelingsgrootheden en de daarbij behorende criteria zijn evaluatieprocedures nodig om een ontwerp te kunnen beoordelen. In hoofdstuk 17 behandelen we methoden om de kostprijs te berekenen. In paragraaf 16.4 komt de doorlooptijd van de assemblage aan de orde. We behandelen in die paragraaf ook een analysemethode voor het inschatten van assemblagetijden.

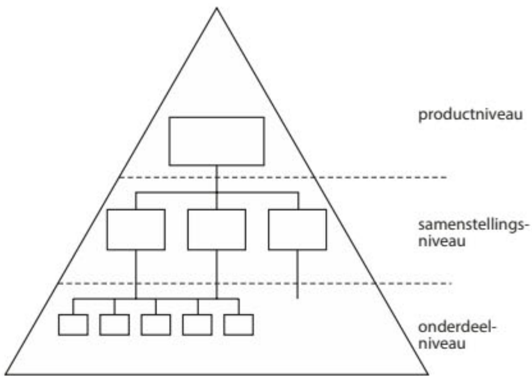
16.4 Methoden en regels bij het productiegericht ontwerpen

In paragraaf 16.3 hebben we uitgelegd dat productiegericht ontwerpen draait om de afstemming tussen het productontwerp en de productie. In paragraaf 16.4.1 zullen we laten zien dat deze afstemming op drie verschillende niveaus kan plaatsvinden, namelijk op productniveau, samenstellingsniveau en onderdeelniveau. In de paragrafen 16.4.2 tot en met 16.4.5 gaan we in op deze drie niveaus. Daarbij behandelen we methoden als productstructurering en standaardisatie. We geven ook ontwerpregels.

16.4.1 Productiegericht ontwerpen op drie niveaus

De beslissingen die ontwerpers nemen ten aanzien van het productontwerp kunnen globaal ingedeeld worden volgens drie hiërarchische niveaus (zie figuur 16.5):
- productniveau;
- samenstellings- of deelassemblageniveau;
- onderdeelniveau.

Het **productniveau** betreft het opdelen van het product in samenstellingen. Het resultaat van ontwerpbeslissingen op productniveau is een **productstructuur**, die laat zien uit welke samenstellingen het product is opgebouwd. In de productstructuur zijn de relaties, de interfaces, tussen de samenstellingen ook gedefinieerd. Op **samenstellingsniveau** worden ontwerpbeslissingen genomen die betrekking hebben op één samenstelling. Deze beslissingen betreffen het opdelen van de samenstelling in kleinere elementen, namelijk in onderdelen (en in



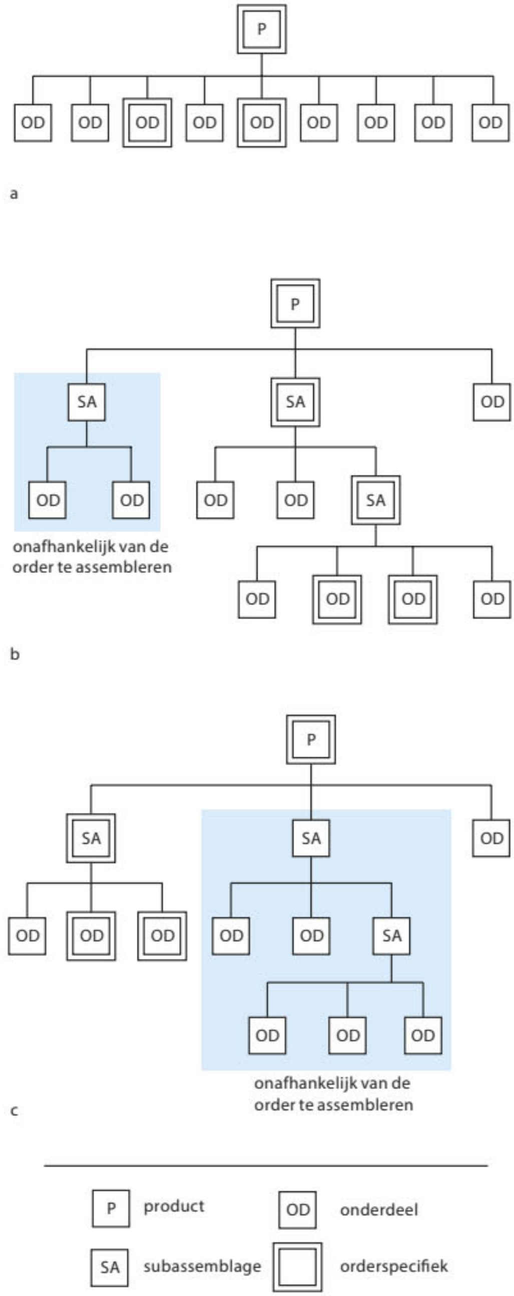
Figuur 16.5 Ontwerpbeslissingen op drie niveaus

sommige gevallen natuurlijk in deelsamenstellingen). Op deze manier kan de productstructuur uit meerdere lagen bestaan. Ook nu worden de relaties tussen de onderdelen gedefinieerd. Op **onderdeelniveau** staan beslissingen omtrent één individueel onderdeel centraal. Het betreft beslissingen over geometrie, materiaal, dimensies en toleranties.

Het is belangrijk om in te zien dat de impact van beslissingen op de verschillende niveaus successievelijk afneemt. Bij beoordelingsgrootheden als doorlooptijd of kosten, is bijvoorbeeld vooral op hogere niveaus winst te behalen. Dit kunnen we illustreren aan de hand van de assemblagedoorlooptijd. Op productniveau kan men besluiten één grote samenstelling op te splitsen in twee kleinere samenstellingen die parallel aan elkaar gemonteerd kunnen worden. Dit kort de doorlooptijd van de assemblage van het geheel aanmerkelijk in. Op samenstellingsniveau kan men besluiten twee onderdelen tot één geheel te integreren (zie paragraaf 16.4.3 voor de criteria waaraan de onderdelen dan moeten voldoen). Dit reduceert natuurlijk de doorlooptijd, maar in veel mindere mate dan het splitsen van de grote samenstelling. Ten slotte kan men op onderdeelniveau besluiten het assemblageproces van één enkel onderdeel te optimaliseren, bijvoorbeeld door het toepassen van centreerranden met afschuiningen. Deze beslissing heeft nog minder effect op de doorlooptijd in de assemblage dan de beslissing op samenstellingsniveau.

16.4.2 Productniveau

Op productniveau wordt het product ingedeeld in samenstellingen of deelassemblages. De productstructuur is een weergave van de samenhang van de verschillende delen van een product. Het laagste niveau in de structuur wordt gevormd door de afzonderlijke onderdelen. Onderdelen kunnen in één of meer stappen samengesteld worden tot grotere eenheden, samenstellingen of deelassemblages (zie hoofdstuk 11). De samenstelling van de deelassemblages vormt het totale product. Op deze wijze ontstaat een **hiërarchische productstructuur** (zie figuur 16.6b). Indien mogelijk moet een deelassemblage zo worden ontworpen dat deze als afzonderlijke eenheid kan functioneren en ook kan worden beproefd. Een dergelijke samenstelling wordt ook wel een module genoemd (zie paragraaf 12.5.1).



Figuur 16.6 Platte productstructuur (a) en hiërarchische productstructuur, waarin de orderspecifieke deelassemblages vroeg (b) en laat (c) worden gemonteerd

Voorbeelden:
- Het rompvoorstuk van een passagiersvliegtuig wordt als losse component getest op lekdichtheid. Na het samenbouwen van de complete romp is het vrijwel onmogelijk om lekkages alsnog af te dichten door de inmiddels ingebouwde installaties.
- De ontwerper definieert een module 'aandrijving' die de motor en een overbrenging bevat, en die tot een geheel wordt samengesteld voordat samenvoeging met het grotere geheel plaatsvindt.

De productstructuur vormt ook het uitgangspunt voor de planning van de in te kopen materialen en componenten, en voor de besturing van de materiaalstroom door het bedrijf met behulp van MRP of PDM (zie hoofdstuk 15).

Het alternatief is een **platte productstructuur**, waarbij het product rechtstreeks uit individuele onderdelen wordt opgebouwd (zie figuur 16.6a).

De hiërarchische structuur biedt de volgende voordelen:
- Modulaire productopbouw. Uit standaardcomponenten kan een verscheidenheid aan producten worden samengesteld. Een leverancier kan op deze manier flexibel reageren op klantenwensen (zie hiervoor het K.O.O.P. in paragraaf 15.2.2). Een deelassemblage kan in principe als een afzonderlijke module worden ontwikkeld. Dit maakt het gelijktijdig ontwikkelen van verschillende deelassemblages mogelijk, waardoor het ontwerptraject korter wordt.
- Deelassemblages kunnen afzonderlijk en gelijktijdig gemonteerd en beproefd worden. Dit leidt tot een verkorting van de montagetijd van het eindproduct. Bovendien zullen het beproeven en het in bedrijf stellen van het eindproduct veel sneller verlopen.

In veel gevallen maakt een product deel uit van een familie van producten. Een productfamilie bestaat uit een aantal productvarianten (zie ook paragraaf 11.3). Deze varianten zijn opgebouwd uit een voor alle producten gelijk deel en een variantspecifiek deel. Het variantspecifieke deel is afhankelijk van de klantenorder. Een voorbeeld van een productfamilie is een type personenauto dat in een groot aantal varianten leverbaar is. Soms zijn de productvarianten functioneel gezien zelfs identiek. We zien dit bijvoorbeeld in de consumentenelektronica. Alleen de buitenzijde en het prijskaartje zijn dan variantspecifiek. Omgekeerd kunnen standaardcomponenten in verschillende productfamilies worden toegepast. Denk aan een elektromotortje dat in een aantal families van scheerapparaten kan worden gebruikt. Dit heeft als voordeel dat de seriegrootte van de standaardcomponenten toeneemt en het orderspecifieke deel slechts een beperkte invloed heeft op het gehele productieproces.

Het is het beste als het variantspecifieke deel zo laat mogelijk ingebouwd kan worden. Hier moet men bij de positionering in de productstructuur rekening mee houden (zie figuur 16.6c). Dit leidt tot kortere doorlooptijden, waardoor men sneller kan reageren op de markt.

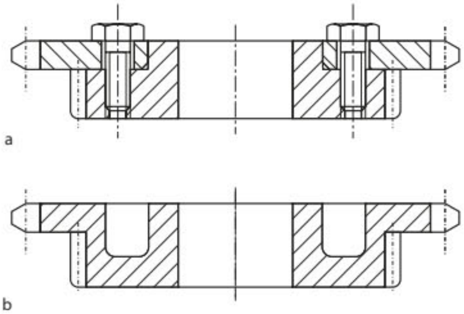
16.4.3 Samenstellingsniveau

Op samenstellingsniveau wordt de samenstelling opgedeeld in individuele onderdelen. We behandelen in deze paragraaf twee aspecten van productiegericht ontwerpen op dit niveau: reductie van het aantal onderdelen en standaardisatie.

Gezien vanuit de assemblage is het ideale ontwerp een ontwerp waarbij geen assemblage nodig is. Dit is te realiseren door het aantal onderdelen in het product te reduceren. Dat is dan ook de primaire regel bij assemblagegericht ontwerpen. Het reduceren van het aantal onderdelen vermindert niet alleen het aantal assemblagehandelingen, maar vereenvoudigt ook de totale logistiek (de inkoop van onderdelen en er zorg voor dragen dat de onderdelen op het juiste moment in de assemblage aanwezig zijn). Het vermindert bovendien de administratieve inspanning (er zijn minder codenummers bij te houden).

De volgende vragen kunnen helpen om te beoordelen of een onderdeel geëlimineerd kan worden of met een ander onderdeel geïntegreerd kan worden:
- Moet het onderdeel ten opzichte van andere onderdelen kunnen bewegen om functionele redenen?
- Moet het onderdeel van een ander materiaal zijn om functionele redenen?
- Moet het onderdeel losneembaar zijn om andere (de)montagehandelingen mogelijk te maken?

Als het antwoord op deze drie vragen 'nee' is, is het onderdeel 'verdacht'. Men kan dan overwegen of



Figuur 16.7 Twee ontwerpen van een combinatie van twee tandwielen voor dezelfde functionaliteit met productietechnische verschillen

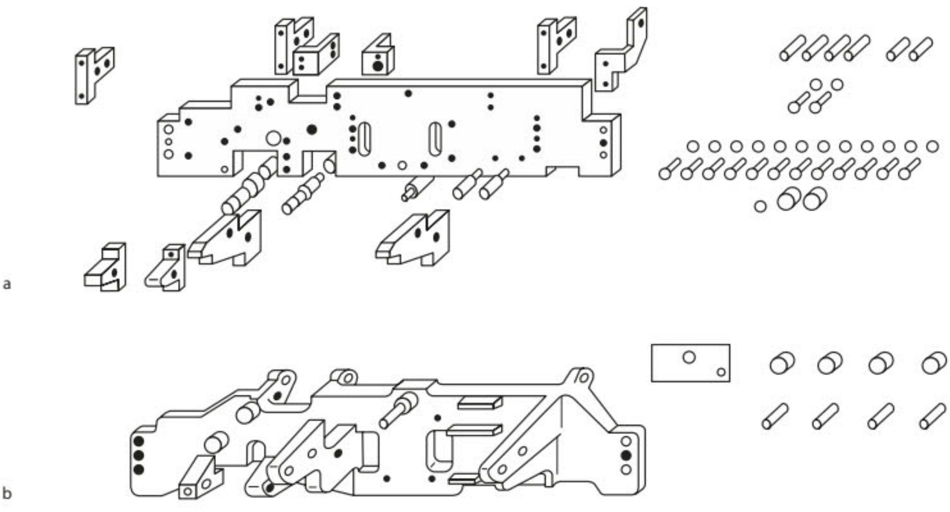
het geëlimineerd kan worden of geïntegreerd met andere onderdelen.

Deze manier van ontwerpen leidt weliswaar tot minder onderdelen, maar de resulterende onderdelen zijn vaak wel complexer van vorm, en daardoor moeilijker te fabriceren. Het is dus belangrijk om niet alleen naar de assemblage te kijken, maar ook naar de fabricage en eventuele andere fasen van de levenscyclus. Figuur 16.7 toont twee ontwerpen van een tandwiel voor dezelfde functionaliteit die productietechnisch gezien totaal verschillend zijn. Bij ontwerp a worden de tandwielen afzonderlijk gefabriceerd met een verspanende bewerking en vervolgens met bouten aan elkaar bevestigd. Ontwerp b kan worden vervaardigd door middel van poedermetallurgie of materiaalaangroeitechnieken. De voordelen hiervan zijn: geen afval, kortere bewerkingstijden en geen montage. Een nadeel van poedermetallurgie is de dure productgebonden matrijs voor het persen. Een nadeel van materiaalaangroeitechnieken kan de lagere belastbaarheid van het tandwiel zijn.

In figuur 16.8 laten we twee alternatieve ontwerpen zien. Een ontwerp is opgebouwd uit 11 betrekkelijk eenvoudige plaatdelen en 42, deels genormaliseerde, verbindingsmiddelen. Het andere ontwerp bestaat uit een complex spuitgietdeel en 10 losse delen. Tegenover de hoge matrijskosten voor het gietstuk staan de compleetstempels voor de 11 plaatdelen, de verlaging van het aantal onderdelen en de lagere montagekosten.

Naast reductie van het aantal onderdelen is reductie van het aantal verschillende onderdelen van groot belang. Dit valt onder het begrip **standaardisatie**. Standaardisatie kent twee aspecten: standaardisatie van componenten en standaardisatie van productieprocessen.

Een ontwerper beschikt over vele, vaak genormaliseerde, standaardonderdelen. Deze onderdelen kunnen functies vervullen als verbinden, lageren, aandrijven en geleiden. Het gebruik van dergelijke onderdelen heeft de voorkeur, uit het oogpunt van de kosten, de kwaliteit en het onderhoud. Daarnaast is het vaak mogelijk de onderdelen die de onderneming zelf maakt te classificeren naar overeenkomst



Figuur 16.8 Twee alternatieve ontwerpen van een schakelarm

in vorm en/of bewerkingen (groepentechnologie, zie ook paragraaf 15.3.3). Dit maakt een standaardisatie van het productenpakket mogelijk, zodat het aantal verschillende onderdelen kan worden gereduceerd. Verder kunnen de productieprocessen hierdoor worden vereenvoudigd en beter beheerst.

Een andere vorm van standaardisatie in de productie is het doelbewust verminderen van het aantal gereedschappen. Standaardisatie biedt de mogelijkheid om met een beperkte verzameling van gereedschappen een groot scala aan producten te maken. Denk bijvoorbeeld aan het beperken van het aantal verschillende gatdiameters.

16.4.4 Onderdeelniveau

Bij de vormgeving van het product gaat het om het vastleggen van de geometrie van de onderdelen, inclusief de afmetingen, de oppervlaktegesteldheid en de toleranties en het kiezen van de materiaalsoort. Enkele van deze aspecten zullen we hier nader belichten.

De geometrie van de onderdelen moet afgestemd zijn op de processen waarmee de onderdelen vervaardigd en geassembleerd zullen worden. Iedere fabricagetechniek heeft specifieke mogelijkheden en beperkingen als het gaat om het genereren van vormen. Voorbeelden hiervan hebben we onder andere behandeld in de hoofdstukken 3, 4 en 5 over oervormen, omvormen en verspanen. Veel van deze kennis is samengevat in **ontwerpregels**. In paragraaf 16.4.5 bespreken we een aantal fabricagegerichte ontwerpregels. Over ontwerpregels is veel literatuur beschikbaar, zoals [16.3], [16.4] en [16.6].

Een beperking in het gebruik van ontwerpregels is dat het aantal ervan vrijwel onbeperkt is uit te breiden. Het overzicht gaat dus gemakkelijk verloren. Daarnaast laat men aan de beoordeling van de ontwerper over wanneer welke regel toegepast moet worden; het zonder meer toepassen van 'alle' regels leidt niet automatisch tot een goed ontwerp. Daarnaast ligt het gevaar van suboptimalisatie op de loer: misschien let men slechts op aspecten waarop de ontwerpregels betrekking hebben. Het is ook mogelijk dat ontwerpregels elkaar tegenspreken. Vanuit het oogpunt van assemblage is minimalisatie van het aantal onderdelen bijvoorbeeld gewenst. Dit leidt echter tot complexere onderdelen, wat ongunstig kan zijn vanuit het oogpunt van de onderdelenfabricage.



a voorzie onderdelen van afschuiningen en vermijd gelijktijdig ingrijpen



b voorzie onderdelen van centreerranden

Figuur 16.9 Voorbeelden van ontwerpregels voor assemblagegericht ontwerpen

Assemblagegericht ontwerpen draait om de eenvoud van het aanvoeren en grijpen van onderdelen, en om de eenvoud van het samenvoegen en verbinden van onderdelen. Dit wordt bepaald door de geometrie van de onderdelen en van de interfaces tussen de onderdelen. In figuur 16.9 zie je twee voorbeelden van assemblagegericht ontwerpen.

De DFA-methode van Boothroyd en Dewhurst [16.4] is een van de methoden om de moeilijkheidsgraad van een assemblagehandeling te vertalen naar de tijd die het kost om die handeling uit te voeren. Deze methode maakt gebruik van tabellen om in te schatten hoelang het uitvoeren van een handmatige montagehandeling duurt. Een voorbeeld van zo'n tabel zie je in figuur 16.10.
De tabellen zijn gebaseerd op een classificatie van assemblagehandelingen, waarbij voor iedere handeling de benodigde tijdsduur gegeven wordt. De tijden zijn verkregen door het uitvoeren van zeer veel metingen.

De afgebeelde tabel laat zien dat een assemblagehandeling wordt gekarakteriseerd door:
- de vraag of een onderdeel direct bevestigd of alleen gepositioneerd wordt;
- de bereikbaarheid en de zichtbaarheid van de montagepositie;
- de noodzaak het onderdeel wel of niet vast te houden na het plaatsen;
- de eenvoud van positioneren;
- de ondervonden weerstand tijdens de montagehandeling.

Ieder onderdeel moet worden beoordeeld op de aspecten uit de tabel (en ook nog op een aantal

TIJDEN VOOR HANDMONTAGE (sec.)
voor eenvoudig handgereedschap, "niet direct vast"

het onderdeel zelf of andere onderdelen worden niet onmiddelijk bevestigd		geen vasthouden nodig na montage om plaats en oriëntatie te behouden				vasthouden nodig na montage om plaats en oriëntatie te behouden			
		plaatsen en uitlijnen bij montage eenvoudig		plaatsen en uitlijnen bij montage moeilijk		plaatsen en uitlijnen bij montage eenvoudig		plaatsen en uitlijnen bij montage moeilijk	
		geen weerstand bij insteken	weerstand bij insteken	geen weerstand bij insteken	weerstand bij insteken	geen weerstand bij insteken	weerstand bij insteken	geen weerstand bij insteken	weerstand bij insteken
		0	1	2	3	6	7	8	9
montageplaats makkelijk te bereiken	0	1,5	2,5	2,5	3,5	5,5	6,5	6,5	7,5
montageplaats moeilijk te bereiken: door belemmering in ruimte of blikveld	1	4,0	5,0	5,0	6,0	8,0	9,0	9,0	10,0
montageplaats moeilijk te bereiken: door belemmering in ruimte en blikveld beide	2	5,5	6,5	6,5	7,5	9,5	10,5	10,5	11,5

Figuur 16.10 Deel van een tabel voor het schatten van tijden voor handmatige assemblage [16.3]

niet-afgebeelde aspecten). In het bijbehorende vakje vind je de tijd die nodig is om het onderdeel te monteren. Door de afzonderlijke assemblagetijden bij elkaar op te tellen is het mogelijk een schatting te maken van de assemblagetijd voor een samengesteld product. In de praktijk is de aanpak van Boothroyd en Dewhurst goed toe te passen, hoewel nieuwere productieprocessen, toenemende automatisering en robotisering een aantal van hun gebruikte criteria en tabellen minder relevant maken. De aanpak houdt bijvoorbeeld geen rekening met het gebruik van robots die tijdens assemblagehandelingen effectief samenwerken met mensen.

Tot slot van deze paragraaf willen we graag enige aandacht schenken aan het gebruik van toleranties. Het belang hiervan wordt vaak onderschat. De ontwerper schrijft toleranties voor om daarmee een bepaalde functievervulling te garanderen. Voor de fabricageafdeling is de tolerantie een eis waaraan de gekozen vervaardigingsmethode moet voldoen (zie hoofdstuk 14). Op de montageafdeling zijn de werkelijk gerealiseerde afmetingen, ofwel de nauwkeurigheid, mede bepalend voor het verloop van het montageproces. Voor de meetafdeling ten slotte, vormen de toleranties de gegevens waaraan de fabricage getoetst moet worden.

16.4.5 Ontwerpregels

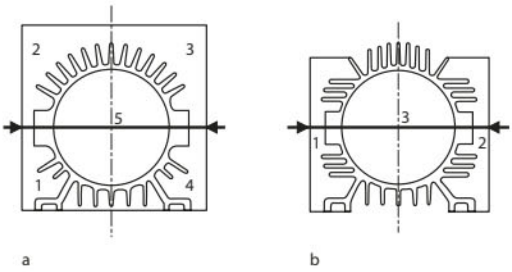
In de verschillende hoofdstukken over productietechnieken hebben we reeds ontwerpregels genoemd met betrekking tot maakbaarheid. Het betrof specifieke aanwijzingen die bij de gegeven productietechnieken relevant en fundamenteel van belang waren. In deze paragraaf bespreken we verschillende maakbaarheidsvragen over de volle breedte van de fabricagetechnieken. We kijken daarbij eerst naar deling, lossendheid en ondersnijding. Daarna richten we onze aandacht op wanddikteovergang en afronding, en vervolgens op richtlijnen voor mechanische bewerking. We sluiten deze paragraaf af door onze blik te richten op de effecten na de fabricagestap.

Deling, lossendheid, ondersnijding

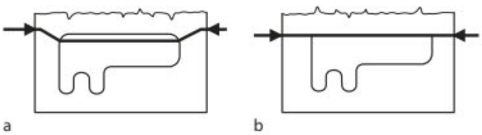
In de voorgaande paragrafen hebben we de keuzeproblematiek rond het opdelen van een samenstelling in onderdelen aangegeven. Men beslist veelal waar de deling plaatsvindt met het oog op de functionaliteit of de maakbaarheid. Bij vormen in een productgebonden gereedschap speelt lossendheid – het product uit de vorm kunnen nemen – de voornaamste rol. Een ondersnijding is hierbij niet toelaatbaar. Wellicht is deze wel mogelijk, maar dan slechts tegen extra hoge kosten.

Bij het zandvormen van kleine series bepalen de modelkosten voor een groot deel de kostprijs van een gietstuk. Het model moet om die reden zo eenvoudig mogelijk zijn en ondersnijdingen moeten vermeden worden (zie ook paragraaf 3.5.3). Vaak is slechts een geringe ontwerpwijziging nodig om een gietstuk lossend te maken. Het maken van een zandvorm kan vereenvoudigd worden door het aantal kernen te beperken. Figuur 16.11 geeft een voorbeeld waarin het aantal kernen van 5 tot 3 is teruggebracht.

Afrondingen op het deelvlak van een gietstuk (zie figuur 16.12) zijn bij het handvormen eenvoudig



Figuur 16.11 Huis van een elektromotor: oorspronkelijk ontwerp met 5 kernen (a) en aangepast ontwerp met 3 kernen (b)



Figuur 16.12 Aanpassing van het ontwerp in verband met de vormdeling : niet-vlakke deling (a), vlakke deling (b)

te realiseren, maar moeten bij machinaal vormen vermeden worden. Bij het machinaal vormen in zand moet de vormdeling vlak zijn en mag er maar één vormdeling zijn.

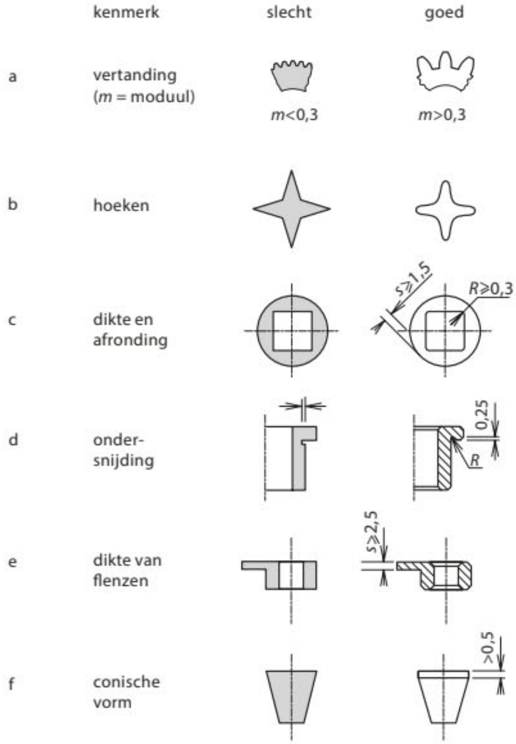
Permanente productgebonden gereedschappen, zoals matrijzen, beperken de vormgeving meer dan verloren vormen. In figuur 3.44b is de lossendheid opgelost door het onderdeel in twee delen op te delen.

Bij poedermetallurgie vormt de persrichting een extra aandachtspunt voor de vormgeving van een onderdeel (zie figuur 3.82). In figuur 16.13d is de uitsparing voor een ring in de persrichting gevormd om ondersnijding te vermijden.

Ondersnijding kan ook ontstaan tijdens de fabricage, bijvoorbeeld bij chemisch frezen (zie figuur 6.13). In een dergelijk geval moeten de maatvoering (hier de opening in het masker) en de procesparameters (hier de etstijd) op de effecten van het fabricageproces worden aangepast.

Wanddikteovergang en afronding

Een veelvoorkomend aandachtspunt is een juiste overgang, zoals een afronding of een wanddikteovergang.

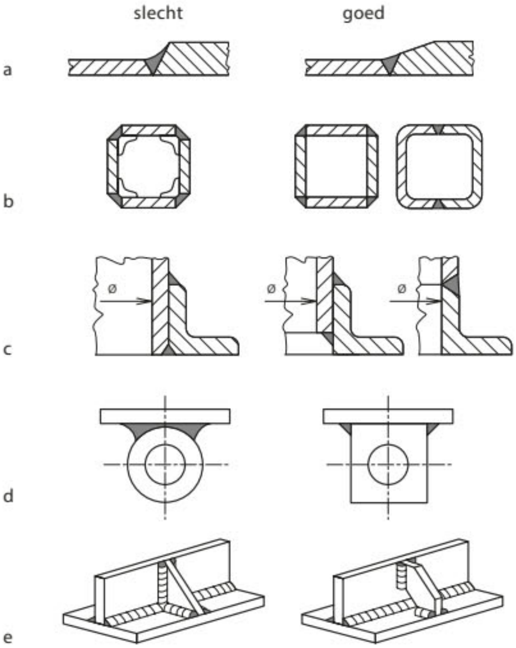


Figuur 16.13 Richtlijnen voor de vormgeving van PM-producten

Bij het gieten hebben we het voorkomen van materiaalopeenhoping besproken (zie figuur 3.39), en de noodzaak van geleidelijke overgangen en het vermijden van scherpe hoeken wegens het risico op scheurvorming (zie figuur 3.40). Bij matrijssmeden is eveneens sprake van een vormgevend gereedschap. De hoeken van de vormholte dienen telkens afgerond te worden (zie figuur 4.28). Hetzelfde geldt voor matrijsbuigen en dieptrekken. De stempel is daarbij altijd van een afronding voorzien, hoe klein ook (zie respectievelijk figuur 4.35 en 4.51).

Op vergelijkbare wijze kunnen bij poedermetallurgie geen scherpe hoeken worden gevormd (zie figuur 16.13b en c), en kan een conische vorm niet in een scherpe hoek eindigen wegens het risico op uitbreken (zie figuur 16.13f). Het lassen van platen van verschillende diktes vereist eveneens een geleidelijke overgang (zie figuur 16.14a).

De haalbare verdichting beïnvloedt de mogelijke vormgeving van een PM-product. De haalbare verdichting heeft bijvoorbeeld invloed op de modulus



Figuur 16.14 Constructieve aanwijzingen voor lasconstructies

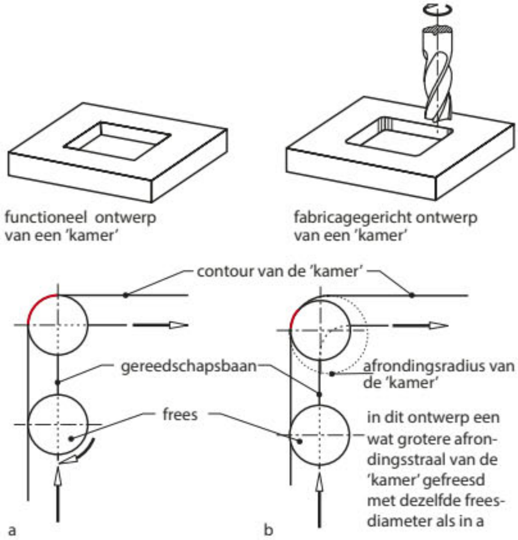
bij een te persen vertanding (zie figuur 16.13a), de minimale wanddikte en afronding in figuur 16.13c, en de minimale wanddikte en het dikteverschil in figuur 16.13e.

De kwetsbaarheid van scherpe hoeken is ook aan de orde wanneer zo'n hoek een beschermlaag dient te krijgen. De hoek heeft een minimale afrondingsradius nodig om een voldoende dikke coatinglaag te kunnen krijgen (zie figuur 10.8).

Richtlijnen voor mechanische bewerking

De snijkant van een verspanend gereedschap heeft een neusradius die groter is dan 0 (zie figuur 5.37). Daarom dienen alle vormelementen die met verspanen worden gegenereerd telkens van een afrondingsradius te worden voorzien. Zo ook de afronding van de hoeken van de gleuf in figuur 14.24, waarmee de afrondingsradius van de te gebruiken frees wordt vastgelegd.

De diameter van een cilindrisch gereedschap bepaalt de vormgeving: dit is evident bij boren en ponsen (zie figuur 7.12), maar ook bij frezen (zie de gefreesde gleuf in figuur 14.33a en in figuur 14.24).

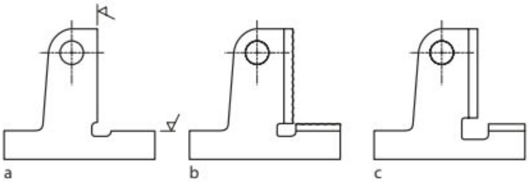


Figuur 16.15 Afstemming tussen afrondingsradius van een 'kamer' en de gereedschapsbaan/freesdiameter

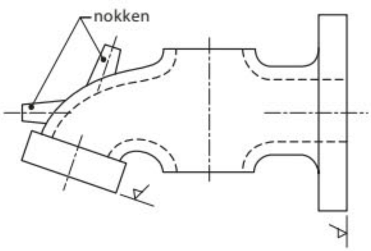
Wanneer een 'kamer' met een vingerfrees moet worden bewerkt, is de diameter van de frees bepalend voor de bewerking (zie figuur 16.15). Het verdient de voorkeur om de 'kamer' met een iets grotere radius te ontwerpen dan de gebruikelijke freesdiameters. Zo is de frees over een kleinere oppervlakte in contact met het materiaal en wordt de kans op trillingen verminderd. Dit resulteert in een hogere kwaliteit.

Bij zandgietwerk vereisen pasvlakken bijna altijd een mechanische nabewerking (zie voor een voorbeeld figuur 14.26). Vaak is het ook nodig om de lossingshoek te verwijderen. Het gietstuk moet dan zo geconstrueerd zijn dat er voldoende bewerkingstoeslag aanwezig is (zie hiervoor hoofdstuk 14) en dat de bewerking mogelijk is en zo goedkoop mogelijk kan worden uitgevoerd. Er moet bijvoorbeeld voldoende uitloopmogelijkheid zijn voor het bewerkingsgereedschap. Aan die voorwaarde lijkt in figuur 16.16a voldaan te zijn. Wanneer in de tekening beide bewerkingstoeslagen zijn aangebracht, is er echter onvoldoende uitloopmogelijkheid voor het gereedschap (situatie b). Door een wijziging in het ontwerp kunnen beide vlakken door frezen worden bewerkt (situatie c).

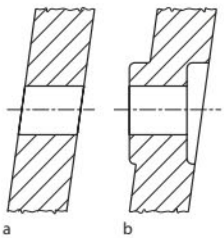
Ruimte voor uitloop van het verspanend gereedschap is telkens noodzakelijk. Zo ook bij het snijden van schroefdraad (zie de draaduitloopgroef in figuur 5.29).



Figuur 16.16 Voorbeeld van een ontwerp (a) dat in verband met nabewerking (zie toeslagen bij b) moet worden aangepast (c)



Figuur 16.17 Huis van een kraan met meegegoten nokken



Figuur 16.18 Aanpassing van het ontwerp (b) om niet in een schuin vlak te hoeven boren (a)



Figuur 16.19 Aanpassing van het ontwerp voor plaatwerk

Door het aangieten van nokken kan het opspannen bij de mechanische nabewerking van een gietstuk vereenvoudigd worden. In figuur 16.17 laten we dit zien voor het huis van een kraan.
Gaten die niet loodrecht op het wandoppervlak staan veroorzaken problemen. Bij het boren van een dergelijk gat wordt de boor weggedrukt, waardoor er een schuin gat ontstaat. In figuur 16.18 zie je hoe het ontwerp in dit geval kan worden verbeterd.

Gelaste constructies hebben ook vaak een verspanende nabewerking nodig: het vlakslijpen van de naad. In figuur 16.14c moet bij de eerste constructie het basisvlak na het lassen vlak worden gemaakt. Bij de tweede optie wordt de las anders gezet, zodat het vlakslijpen van de lasnaad niet meer nodig is. Bij de derde optie is de verbindingslas in een ander vlak geplaatst, zodat de te slijpen lasnaad niet in een functioneel vlak valt.

Het is niet wenselijk dat een plaatonderdeel dicht bij de buiglijn een gat heeft. Indien dat toch noodzakelijk is, moet men zorgen voor voldoende afstand tussen de buiglijn en het gat. (zie figuur 16.19) Men kan het ontwerp ook zo aanpassen dat dicht bij het gat geen buiging noodzakelijk is.

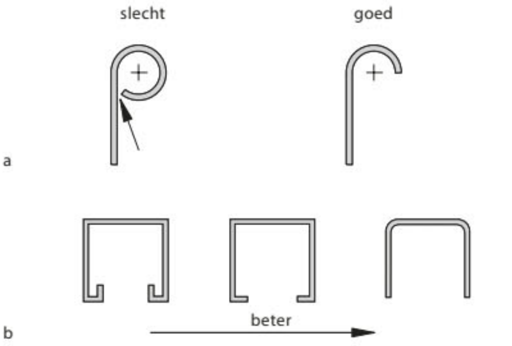
Effecten na de fabricagestap

De fabricage heeft diverse effecten op het materiaal waardoor het eindresultaat van de gewenste vorm en afmetingen kan afwijken. Krimpspanningen veroorzaken kromtrekken, het gevolg van elastische deformatie is terugveren. Met dergelijke effecten dient de ontwerper rekening te houden.
Figuur 3.42 licht toe hoe het kromtrekken van een gietstuk na het mechanisch bewerken kan worden voorkomen. Bij het gieten van kunststoffen is de kans op kromtrekken zelfs groter. Figuur 3.63 geeft twee voorbeelden voor het aanpassen van het ontwerp om kromtrekken tegen te gaan.

Elastische terugvering speelt een grote rol bij het buigen (zie figuur 4.33). De buighoek waarover de buigbewerking wordt uitgevoerd, moet zodanig berekend worden dat hiervoor gecompenseerd wordt. Op vergelijkbare wijze treedt een diktevergroting op in het kunststof profiel na extruderen (zie figuur 3.49). Dit kan worden opgelost door de doorsnede aan te passen (zie figuur 3.50).

Elastische terugvering treedt ook op bij verspanen, zij het in veel mindere mate (zie figuur 5.2). Dit wordt gecompenseerd tijdens de fabricage. Bij walsen speelt elastische terugvering ook een rol (zie figuur 4.4). Het doorbuigen van de walsrol moet worden tegengegaan om de gewenste productvorm te verkrijgen.

In figuur 16.20a is in het eerste ontwerp geen rekening gehouden met het bekleden. Het coatingmateriaal zal waarschijnlijk door capillaire werking door



Figuur 16.20 Constructieve aanwijzingen voor voorwerpen die voorzien moeten worden van een deklaag

de naad in de holte indringen, maar er mogelijk niet uit kunnen. Hierdoor is er risico op naloop, het 'druppen' van de verf. Figuur 16.20b geeft aan hoe het achterblijven van vloeistofresten kan worden vermeden.

De beschreven ontwerpregels geven slechts een eerste indicatie van wat de afstemming tussen ontwerpen en fabricage betekent. Fabrikanten kunnen een veel uitgebreidere set aanwijzingen geven. De samenwerking tussen ontwerper en productietechnicus is onderdeel van het multidisciplinair veld van het ontwerpen.

16.5 Keuzes bij productontwikkeling

De ontwerper vertaalt het initiële productconcept naar een volledig uitgewerkt ontwerp. Hierbij wordt veel gebruikgemaakt van de kennis van experts die bij het traject betrokken zijn, zoals de marketeer, ergonoom, vormgever en productievoorbereider. Er is dus veel informatie voorhanden en er worden vele keuzes gemaakt en beslissingen genomen. Met behulp van deze informatie wordt een programma van eisen opgesteld.

De eerste taak van het ontwerpteam is om vanuit het programma van eisen vast te stellen welke aspecten invloed zullen hebben op de concrete probleemstelling. Vervolgens kunnen deze aspecten verder gespecificeerd worden. Op die manier kan er voortdurend een overzicht beschikbaar zijn, tegen de achtergrond van alle mogelijkheden. Het programma van eisen kan bijvoorbeeld als input dienen voor het kiezen van een materiaal en/of productiemethode. Het schept daarbij als het ware de randvoorwaarden op basis waarvan selectiecriteria tot stand komen voor de materiaal- en productiekeuze. Het eerste programma van eisen is vrijwel nooit helemaal volledig en zal dus later aangepast of aangevuld worden. De eisen moeten, voor zover mogelijk, gekwantificeerd worden, omdat anders het vergelijken van alternatieven geen eenduidige resultaten zal opleveren. Uiteindelijk zullen de selectiecriteria voor het kiezen van materiaal en productiemethode dus een kwantitatieve waarde moeten hebben: de zogenoemde **grenswaarde**.

Niet alle eisen kunnen direct worden meegenomen bij het maken van een keuze voor een materiaal en/of productiemethode. De reden hiervoor is dat er vaak zoveel eisen zijn dat daardoor het keuzeproces onoverzichtelijk wordt. Bovendien kan dit veel onnodig werk opleveren. Binnen het programma van eisen wordt daarom onderscheid gemaakt tussen selectie- en controle-eisen. De **selectie-eisen** zijn de belangrijkste eisen. In eerste instantie wordt een keuze hierop gebaseerd. De **controle-eisen** dienen ter controle van de gemaakte keuze. Daarbij wordt gekeken of het materiaal en de productiemethode aan deze eisen voldoen. De ontwerper maakt binnen het programma van eisen de indeling in selectie- en controle-eisen.

De indeling van het programma van eisen ligt niet definitief vast. Gedurende het ontwikkeltraject kan blijken dat bepaalde eisen toch belangrijker of minder belangrijk zijn dan het ontwerpteam aanvankelijk dacht. Selectie-eisen kunnen dan controle-eisen worden en andersom.

Het is ook mogelijk dat er aspecten naar voren komen die nog niet waren opgenomen in het programma van eisen. Deze kunnen dan toegevoegd worden en verder worden meegenomen. Men moet dan wel goed controleren of ze niet strijdig zijn met al eerder vastgelegde eisen. Ook moet op elk moment helder zijn aan welke eisen al wordt voldaan en welke eisen nog nader onderzocht moeten worden.

Behalve de selectie- en controle-eisen zal in het programma van eisen ook duidelijk het belangrijkste **ontwerpdoel** moeten worden gesteld. Dit doel moet de materiaal- en/of productiekeuze kunnen optimaliseren. Mogelijke doelen zijn het zo goedkoop mogelijk op de markt te brengen van een product, om dat in een bepaalde prijsklasse te doen of het

product te introduceren op een bepaald tijdstip (bijvoorbeeld voor de feestdagen). Het gestelde doel is tevens een van de belangrijkste selectiecriteria.

In de volgende paragrafen zullen we aan de hand van twee voorbeelden tonen hoe de ontwerper op een geïntegreerde manier materialen, processen en vorm kan kiezen. Het is belangrijk om op te merken dat we in beide gevallen slechts een beperkt deel van het gehele ontwerptraject belichten. Ook is de context (zoals de bedrijfsomgeving, organisatiestructuur, ervaring, beschikbare machines enzovoort) nauwelijks bekend. Daarom moeten in deze voorbeelden veel aannamen worden gedaan. Het doel van de voorbeelden is vooral om te laten zien hoe de randvoorwaarden en aannamen, en in het bijzonder de verschillende uitgangssituaties, het keuzeproces kunnen beïnvloeden.

In het eerste voorbeeld (het buitenwerk van een nietmachine, zie figuur 1.13) wordt de productgeometrie bekend verondersteld en moeten het materiaal en de productiemethode nog gekozen worden. Het tweede voorbeeld betreft een boterhamzakje. Hier wordt de functionaliteit als bekend verondersteld en heeft de ontwerper meer vrijheid om een materiaal en een productiemethode te kiezen.

16.5.1 Keuzevoorbeeld: nietmachine

Context

De vorm en de functie van nietmachines (zie figuur 16.21) worden bekend verondersteld. In dit voorbeeld kijken we naar het kunststof constructiedeel. Het doel is om voor dit deel een bruikbaar voorstel voor het materiaal en voor de productiemethode te doen.

Initieel programma van eisen (PvE)

We beginnen met het opzetten van een eerste programma van eisen, waarin de meest voor de hand liggende randvoorwaarden worden vastgelegd. In dit geval komen de volgende aspecten (in willekeurige volgorde) naar voren:
- veel producten;
- 'onbreekbaar' materiaal;
- in verschillende kleuren te maken;
- eenvoudige vorm (uit één stuk);
- voordelig product (lage verkoopprijs);
- beperkte massa;
- veilig;



Figuur 16.21 Voorbeelden van nietmachines

Selectie-eisen		Controle-eisen
lage kostprijs	maximaal € 0,40 per onderdeel	veilig
omgevings-temperaturen	kamertemperatuur	massa
gewicht	dichtheid	in meerdere kleuren te maken
hoeveelheid producten	± 100.000	gevoelswaarde
krasvast	hardheid	afdanking
'onbreekbaar'	slagvastheid	
verkleuren	UV-bestendigheid	
doel: doe een bruikbaar voorstel voor een combinatie van materiaal en proces.		

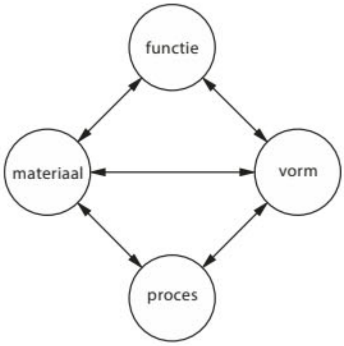
Figuur 16.22 Selectie- en controle-eisen voor de behuizing van de nietmachine

- sterk;
- krasvast;
- materiaal mag niet verkleuren;
- gevoelswaarde van het oppervlak.

PvE opgedeeld in selectie- en controle-eisen en gekwantificeerd

In figuur 16.22 hebben we een opdeling van de eisen in selectie-eisen en controle-eisen weergegeven. Bovendien geven we van een aantal eisen een kwantitatieve inschatting. Deze waarden worden voornamelijk bepaald door de omgevings- en gebruikscontext.

Onze eerstvolgende stap is het koppelen van de selectie-eisen aan de te kiezen producttermen uit figuur 16.23. Zo worden de eisen over omgevingstemperatuur en krasvastheid gekoppeld aan de productterm 'materiaal'. De hoeveelheid producten wordt gerelateerd aan de productterm 'proces'. Massa is een criterium dat zowel aan geometrie, ofwel 'vorm', als materiaal gekoppeld kan worden. Dit criterium zorgt dus voor een verbinding tussen deze producttermen.



Figuur 16.23 Producttermen en de samenhang daartussen

Materiaal – selectiecriteria:
De selectie-eisen moeten gekwantificeerd worden, zodat er op een meer objectieve manier mee omgegaan kan worden. Om die vertaalslag goed te kunnen maken, is veel onderzoek of ervaring nodig. In dit geval gaan we uit van de volgende gegevens:
- maximumdichtheid: ongeveer 1.500 kg/m³;
- minimumslagvastheid: 10 kJ/m²;
- maximummateriaalprijs: 2,00 €/kg.

Materiaal – controle-eisen:
- sterk en stijf genoeg om de functie te vervullen;
- beschikbaarheid van een passend productieproces voor de combinatie van vorm en materiaal.

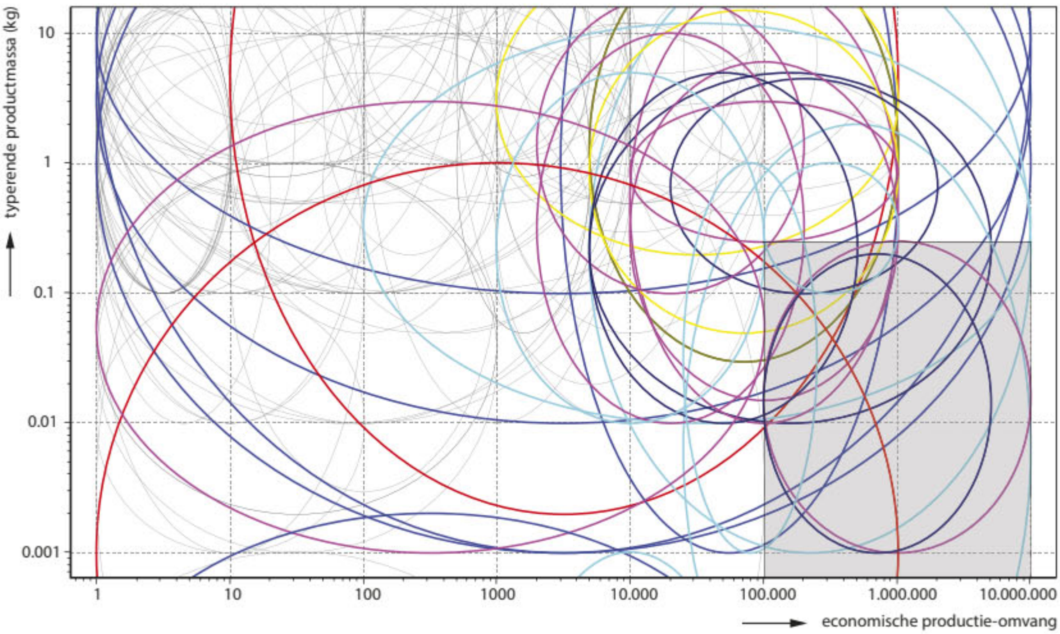
Productiemethode – selectiecriteria:
- verwacht productmassa is maximaal 0,250 kg;
- economische productieomvang is minimaal 100.000 producten;
- realisatie van de geometrie: de vorm moet gemaakt kunnen worden met één productietechniek.

Productiemethode – controle-eisen:
- de methode moet beschikbaar zijn voor het te kiezen materiaal en de geometrie van het product.

Met behulp van deze criteria zal een selectie worden gemaakt. In dit geval beginnen we met de productiemethode.

Proceskeuze

In dit voorbeeld maken we gebruik van de **Cambridge Engineering Selector** (**CES**, [16.8]). Deze software biedt ontwerpers ondersteuning bij het selecteren van materialen, processen en vorminformatie. Het programma kan op basis van door de gebruiker opgegeven criteria grafisch selecties weergeven en laten zien welke materialen nog aan de selectie voldoen. Bovendien kan het zeer gedetailleerde informatie geven over bijvoorbeeld materiaaleigenschappen en productieprocessen.



Figuur 16.24 Typerend productmassa uitgezet tegen economische totaalserie (het door de gebruiker geselecteerde gebied is grijs)



Figuur 16.25 Productieprocessen (zoals voorgesteld door de CES)

Om een eerste selectie van beschikbare processen te maken, gaan we uit van de criteria economische totaalserie en typerend productgewicht. Het **typerende productgewicht** is een proceskenmerk dat aangeeft voor welke gewichtsklasse van producten het proces geschikt is. Beide criteria kunnen gebruikt worden om een grafiek te maken waarin alle beschikbare processen uitgezet worden. Deze grafiek zie je in figuur 16.24.

Elke ellips geeft de karakteristieken van een bepaald proces weer. De grootte van de ellips geeft de spreiding met betrekking tot beide criteria weer. Zo is bijvoorbeeld productmassa bij sommige processen relatief onbelangrijk. Dit levert een brede ellips op. Als een ellips smaller is, geeft dat aan dat voor dat proces het productmassa veel kritischer is.

In dit geval kunnen we op basis van het programma van eisen een deel van de grafiek selecteren (het grijze gebied in figuur 16.24). Het is immers bekend dat het productmassa lager zal zijn dan 0,250 kg en dat de economische productieomvang boven de 100.000 stuks zal liggen. Door deze criteria toe te passen, vallen er veel productieprocessen af, en blijven er – in dit voorbeeld – nog bijna 30 processen over.

Dat lijken er nog veel om uit te kiezen, maar we kunnen dit aantal eenvoudig reduceren door twee voor de hand liggende criteria te gebruiken. De geometrie van het onderdeel is immers bekend, evenals het doel om het onderdeel in één productiegang te maken. In een selectieprogramma als de CES kunnen we daarom kijken naar de typering van de geometrie en het type proces. In dit geval heeft het producttype 3D-vormkenmerken en moeten we een primair vormgevend proces gebruiken (zie paragraaf 14.2).
Als we deze twee criteria combineren met de eerste verzameling criteria, blijft er nog maar een beperkt aantal geschikte processen over (zie figuur 16.25).

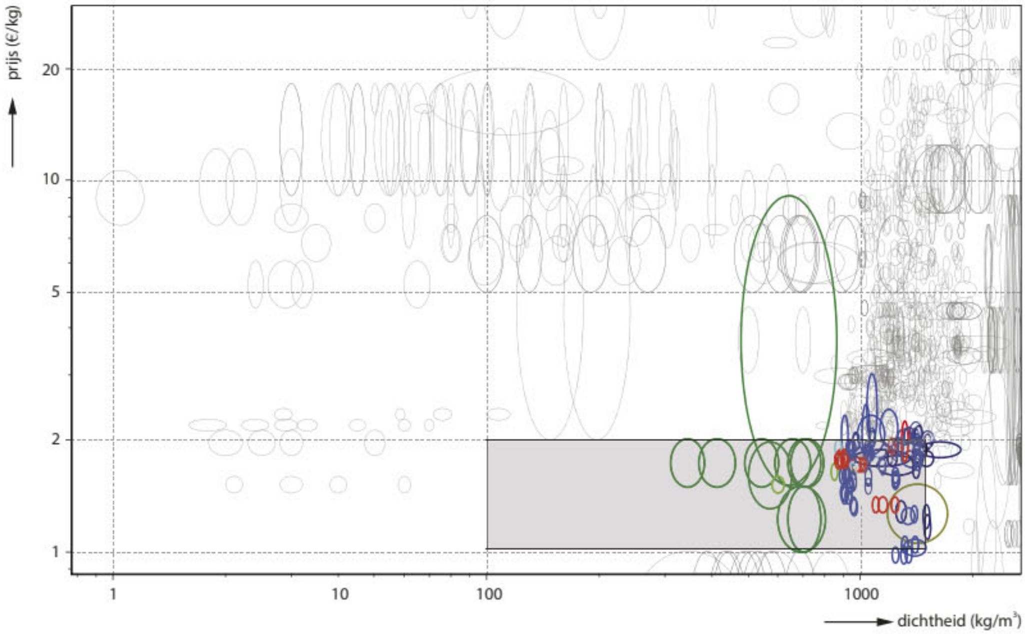
Op basis van ervaring zal een ontwerper snel geneigd zijn om in deze lijst direct prioriteiten aan te brengen. Hij zal verwachten dat het materiaal uiteindelijk wel een kunststof zal worden, hoewel metalen ook mogelijk zijn. Bovendien kan hij ook al snel inschatten wat de benodigde wanddikte van de componenten zal worden. Om te voorkomen dat hij te snel conclusies trekt, kan hij eerst nog kijken naar de verwachte kosten per product voor elk van de processen. Op basis van deze criteria kan hij besluiten eerst de geschiktheid van spuitgieten verder te onderzoeken. De CES noemt als voorbeeldproducten bij dat proces behuizingen, knoppen en handvatten, dus die keuze lijkt terecht.

Vanwege het verschil in uitstraling tussen kunststof en metaal lijkt het verantwoord om in eerste instantie te kijken naar een kunststof als materiaal voor de behuizing van de nietmachine. Als eerste voorstel voor een mogelijk productieproces wordt daarom spuitgieten van thermoplasten gekozen (zie paragraaf 3.12 met figuur 3.56). Dit proces voldoet ook aan controle-eisen zoals oppervlaktekwaliteit.

Op basis van dat gegeven kan de CES een lijst van materialen genereren die verwerkt kunnen worden door middel van spuitgieten. In dit geval bevat die lijst tientallen materialen, waardoor er nog steeds veel vrijheid in materiaalkeuze bestaat. De beschikbare materialen kunnen worden ingedeeld in composieten, schuim en polymere materialen. Vanwege het type product kijken we in eerste instantie naar de polymere materialen.

Allereerst selecteren we materialen op basis van dichtheid en materiaalprijs. De keuzemogelijkheden zijn weergegeven in figuur 16.26. De selectiecriteria zijn direct afgeleid uit de eisen: een dichtheid kleiner dan 1.500 kg/m^3 en een materiaalprijs lager dan € 2,00/kg. De ondergrens voor de dichtheid is gesteld op 100 kg/m^3, omdat materialen die onder deze grens liggen waarschijnlijk geen realistische oplossing zullen bieden.

Dit reduceert het aantal geschikte materialen al behoorlijk. Zo vallen vrijwel alle geschuimde materialen af. Er blijven echter nog meer dan 50



Figuur 16.26 Alle thermoplasten gerelateerd aan dichtheid en prijs

materialen over. Om dit aantal verder te reduceren, kijken we nu naar het criterium slagvastheid ofwel breeksterkte. Beide criteria geven vergelijkbare uitkomsten, dus de keuze valt hier – arbitrair – op slagvastheid. Dit criterium kan worden afgewogen tegen de weerstand tegen uv-straling (afgeleid uit onder andere de kleurechtheid).

De verzameling materialen die overblijft, is gereduceerd tot materialen uit vier hoofdgroepen: polyetheen (PE), polyoxymethyleen (POM), polypropeen (PP) en polyvinylchloride (PVC). Een snelle blik op de toepassingsvoorbeelden van deze materialen leert ons dat in het programma van eisen een belangrijke eis niet is opgenomen: er worden ook voorbeelden van producten als tuinslangen en namaakleer gegeven. Met andere woorden: we hebben geen eisen gesteld aan de mechanische eigenschappen van het materiaal. Om dit alsnog mee te nemen in het traject is nog een iteratie nodig: aan het programma van eisen wordt de eis toegevoegd dat het materiaal voldoende sterk en stijf moet zijn. Dit vertalen we naar de treksterkte en de elasticiteitsmodulus van het materiaal.

Omdat de processelectie niet beïnvloed wordt door eisen gerelateerd aan elasticiteitsmodulus en treksterkte, verandert onze proceskeuze niet door de invoering van de extra eis. Daarom kan het nieuwe criterium gewoon gebruikt worden als een extra criterium voor de keuze tussen de vier genoemde hoofdgroepen. Als we in de CES de elasticiteitsmoduli van de vier hoofdgroepen vergelijken, blijkt dat polypropeen (PP) het meest geschikte materiaal is. Niet alleen voldoet het aan alle eisen gesteld in het programma van eisen, maar bij de toepassingsvoorbeelden worden ook producten als bumpers, behuizingen voor batterijen, kratten en mechanische onderdelen genoemd. Daarmee lijkt polypropeen (PP) een goede keuze.

Daarmee is uit het programma van eisen en een schatting van de productvorm een productieproces geselecteerd (spuitgieten). Hierbij speelt de ervaring van de ontwerper wel mee (bijvoorbeeld over wanddikten). Op basis van de proceskeuze kan uit de daarvoor geschikte materialen een materiaal voor de behuizing van de nietmachine geselecteerd worden. In dit geval is onze eerste inschatting van de materiaal/procescombinatie uitgekomen op het spuitgieten van polypropeen.

16.5.2 Keuzevoorbeeld: boterhamzakje

Context

Bij het keuzetraject voor het plastic zakje, ofwel 'boterhamzakje', gaan we ervan uit dat de functie wel bekend is, maar dat de vorm nog niet vastgelegd is. De belangrijkste aanname is dat er een zakje moet worden ontworpen dat de mogelijkheid biedt om etenswaren in te bewaren. Het zakje zal na gebruik worden weggegooid. In het voorbeeld worden de termen 'rol' en 'product' gebruikt; een rol bevat 100 boterhamzakjes en een afzonderlijk zakje wordt aangeduid als product.

Initieel programma van eisen (PvE)

Iedereen heeft wel een beeld van de eisen waaraan een boterhamzakje moet voldoen. Daarom lijkt het in eerste instantie erg eenvoudig een programma van eisen op te stellen. Om daarin tot een volledige en voldoende gedetailleerde beschrijving te komen is echter een betere analyse van het type product en de productcontext nodig. We doen een aantal aannamen en stellen het volgende initiële programma van eisen op:
- voordelig (lage verkoopprijs);
- verkoopeenheid: ongeveer 100 stuks per rol, één rol per verpakking;
- geurloos;
- smaakloos, en het boterhamzakje mag geen invloed hebben op de smaak van de producten erin;
- doorzichtig;
- bestand tegen voorkomende omgevingstemperaturen;
- waterbestendig, niet noodzakelijk vaatwasmachinebestendig;
- het materiaal moet afbreekbaar en/of recyclebaar zijn;
- geschikte verpakking voor verkoop in supermarkten;
- ruwe schatting van de eerste productieserie: 100.000 rollen;
- functionele eisen:
  - inhoud 1 liter per product;
  - zakjes eenvoudig te scheiden van de rol;
  - flexibel materiaal.

Uit dit programma van eisen blijkt dat daar zeer verschillende en onderling nauwelijks vergelijkbare eisen in kunnen voorkomen. Een aantal eisen geeft duidelijk richting aan het ontwikkeltraject, een aantal andere eisen is slechts geschikt ter controle. Een voorbeeld van die laatste categorie is de eis 'flexibel materiaal'. Voor ontwerpers heeft dit te maken met zowel de vorm als met het materiaal. Daartussen bestaat een sterke wisselwerking. Een dergelijke eis is daarom nauwelijks geschikt als selectiecriterium, maar dient veel meer als controle van potentiële oplossingen. In veel gevallen zal het maken van prototypes uitkomst kunnen bieden.

PvE opgedeeld in selectie- en controle-eisen en gekwantificeerd

In figuur 16.27 hebben we de eisen uit het PvE opgedeeld in selectie- en controle-eisen. Bovendien geven we van een aantal eisen een kwantitatieve inschatting. Deze waarden worden voornamelijk bepaald door de omgevings- en gebruikscontext.

De selectie-eisen koppelen we vervolgens aan de te kiezen producttermen 'materiaal' en 'proces'.

Materiaal – selectiecriteria:
- transparantie: materiaal moet transparant (kunnen) zijn;
- materiaalprijs: € 0,0075/gram;
- maximale gebruikstemperatuur: minimaal 50 °C;
- smeltpunt: ruim boven gebruikstemperatuur.

Materiaal – controle-eisen:
- flexibiliteit; deze moet bij elk concept gecontroleerd worden. Het product hoeft niet heel elastisch te zijn, maar mag zeker niet te stijf zijn. Dit is echter niet of nauwelijks te kwantificeren;
- afdanking: het product mag na afdanking niet te veel schade toebrengen aan het milieu.

Selectie-eisen		Controle-eisen
lage verkoopprijs	maximaal € 1,50 per rol	waterbestendigheid
verschillende omgevingstemperaturen	−20 tot 40 °C	geurloos
hoeveelheid producten	± 100.000 rollen	flexibel
smaakbeïnvloeding	geen	afdanking
transparantie	doorzichtig of doorschijnend	
doel: vind een materiaal en een daarbij passend productieproces		

Figuur 16.27 Selectie- en controle-eisen voor het boterhamzakje

Productiemethode – selectiecriteria:
- economische productieomvang: minimaal 100.000 rollen, dus 10.000.000 producten;
- materiaal.

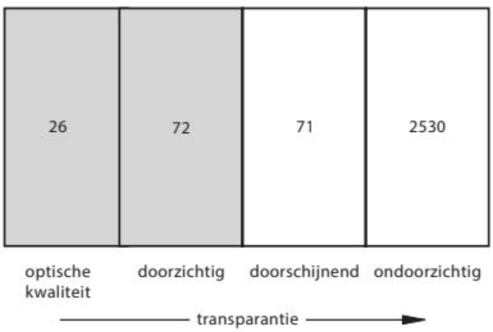
Productiemethode – controle-eisen:
- vorm.

Op basis van deze criteria zullen we een eerste selectie maken. We beginnen daarbij met het kiezen van een materiaal.

Materiaalkeuze

Ook in dit voorbeeld wordt het softwarepakket CES gebruikt. Allereerst richten we ons op de transparantie van het materiaal. Grafisch kan dat gerepresenteerd worden door de materialen in te delen in de verschillende optische eigenschappen (zie figuur 16.28). In deze figuur zijn alle materialen ingedeeld in 4 groepen, variërend in optische kwaliteit van 'transparant' tot 'ondoorzichtig'. Het getal in elk vak geeft aan hoeveel materialen er tot een bepaalde categorie behoren. Omdat het materiaal transparant moet zijn, selecteren we beide linkerdelen van de figuur. De niet-transparante materialen vallen dus af. Er blijft dan een lijst met tientallen beschikbare materialen over.

Hierna kunnen we de criteria met betrekking tot materiaalprijs en maximale gebruikstemperatuur verwerken. Deze beide criteria kunnen in een grafiek opgenomen worden. In figuur 16.29 hebben we deze grafiek weergegeven en ook de grenswaarden geselecteerd (de maximumprijs is € 7,50/kg en de toelaatbare gebruikstemperatuur moet ten minste 50 °C zijn). De ellipsen geven steeds een materiaaltype weer, waarbij de breedte en hoogte van de ellips maten zijn voor de spreiding van de materiaaleigenschappen. De prijs van een materiaal is dus niet exact weer te geven, maar de breedte van de ellips geeft de voorkomende variatie weer.



Figuur 16.28 Indeling van materialen op basis van transparantie (het getal in de kwadranten geeft het aantal materialen weer)

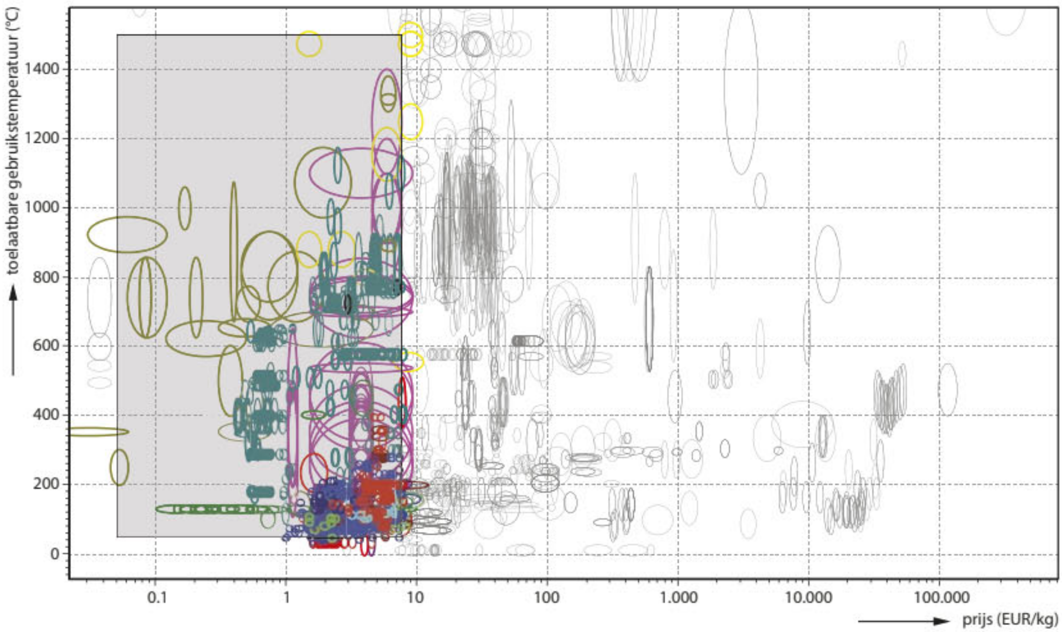
Op basis van de materialen die overgebleven zijn na de selectie op transparantie wordt de lijst met geschikte materialen verder verkleind. Na deze selectie blijven er nog te veel materialen over (in dit voorbeeld ongeveer 85).

Dit aantal materialen is te groot om te vergelijken aan de hand van de controle-eisen. Daarom gaan we dit aantal verkleinen in een iteratieslag. Het scherper stellen van het criterium voor transparantie heeft geen zin, omdat dit een ja/nee-eigenschap van materialen is: een materiaal is transparant, of niet. Daarom blijven de criteria 'gebruikstemperatuur' en 'prijs' over. We moeten afwegen welk criterium belangrijker is in deze stap. Omdat het kiezen van een materiaal met een hogere maximale gebruikstemperatuur niet substantieel bijdraagt aan de kwaliteit van de oplossing, kijken we vanzelfsprekend naar geschikte materialen met een lagere prijs. We stellen de selectie in de grafiek van figuur 16.29 dus op de horizontale as naar beneden bij, totdat er een overzichtelijk aantal materialen overblijft. De selectie voor de materiaalprijs wordt daarna verlaagd tot € 1,50 /kg, zodat er minder dan 10 materialen nog aan alle criteria voldoen. De vier belangrijkste materialen uit de selectie zijn dan:
- polyetheentereftalaat (PET);
- polyetheen (PE);
- polystyreen (PS);
- polypropeen (PP).

Na deze optimalisatie van het criterium 'prijs' kunnen we wel naar de controle-eisen kijken. Mocht geen van de materialen daaraan voldoen, dan kunnen we in volgende iteratieslagen de selectie voor materiaalprijs weer verruimen, zodat deze meer materialen bevat.

In dit geval kunnen we echter eerst eens naar de eigenschappen en veelgebruikte toepassingen in de database kijken. De controle-eisen die we daarbij meenemen zijn flexibiliteit, smelttemperatuur, waterbestendigheid, geurloosheid en recylcebaarheid.

Hierdoor valt polystyreen af; hoewel het materiaal goed tegen water bestand is en recyclebaar is, is het



Figuur 16.29 Materialen ingedeeld op basis van prijs en toelaatbare gebruikstemperatuur

nogal milieuonvriendelijk (vanwege de stoffen die vrijkomen bij de productie) en blijkt de flexibiliteit veelal onvoldoende voor plastic boterhamzakjes. Als productvoorbeelden worden namelijk videocassettes en huishoudapparaten genoemd. Ook polypropeen heeft problemen met deze controle-eis; met productvoorbeelden als kratten en bumpers lijkt dit geen geschikt materiaal voor de zakjes. PET lijkt goed te voldoen aan de controle-eisen. Het kan goed tegen water, heeft een hoog smeltpunt, is goed recyclebaar en geeft geen geur af. Maar ook hier zijn de voorbeelden van toepassingen reden om het materiaal af te laten vallen: geblazen flessen en fotofilms. Er worden wel folieachtige producten genoemd, maar allemaal met grotere dikten.

Het materiaal PE voldoet ook aan alle controle-eisen. Bij de voorbeelden van gebruik staat verpakkingsfolie genoemd, en enkele producten die in aanraking komen met voedingsmiddelen. Daaruit blijkt dat PE op basis van het gestelde programma van eisen het meest geschikte materiaal is.

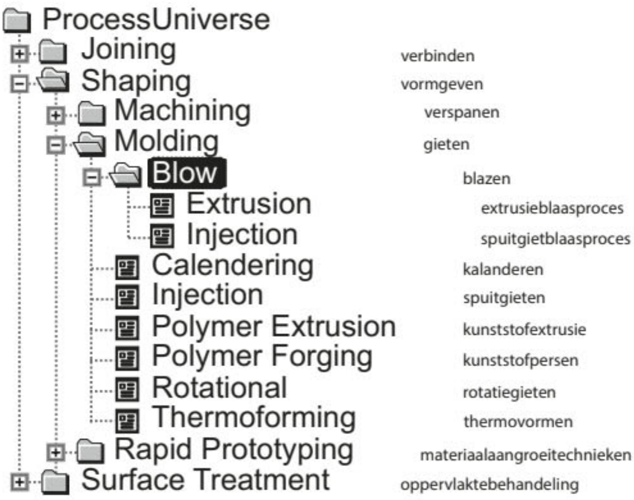
Proceskeuze

De materiaalkeuze vormt echter niet de hele oplossing. De typische vorm van boterhamzakjes moet ook nog geproduceerd kunnen worden met dit materiaal, en dat tegen aanvaardbare kosten en met een aanvaardbare productiesnelheid. Vanuit de initiële materiaalkeuze gaan we nu dus zoeken naar geschikte productieprocessen. Hierbij moeten we de volgende gegevens in gedachten houden:

- de productieomvang is minimaal 100.000 rollen;
- verwacht wordt dat de productieomvang op termijn veel hoger zal worden;
- het materiaal PE moet verwerkt kunnen worden;
- de gewenste geometrie moet gerealiseerd kunnen worden in het materiaal door het te kiezen proces.

De CES kan direct de beschikbare productieprocessen voor een bepaald materiaal selecteren. Figuur 16.30 geeft deze selectie weer voor ons materiaal PE.

De proceskeuze draait vervolgens om het maken van het product vanuit een ruw materiaal. Er zal dus een vormgevend proces (*Shaping*) nodig zijn. Binnen deze vormgevende processen kunnen we verder selecteren. Met een verspanende bewerking (*Machining*) kan de gewenste vorm niet gemaakt worden, deze categorie valt dus af. We verwachten dat de materiaalaangroeitechnieken (*Rapid Prototyping* in figuur 16.30) te duur zijn gezien het aantal producten, maar omdat hiervoor een selectiecriterium beschikbaar is, zullen we deze groep productieprocessen nog even meenemen. Ten slotte



Figuur 16.30 Hiërarchie van geschikte productieprocessen

selecteren we op de economische totaalserie.

Er blijven nu nog slechts drie productiemethoden over: *Blow Moulding*, *Rotational Moulding* en *Rapid Prototyping* . Nu moeten we controleren of de gewenste vorm ermee gemaakt kan worden (de controle-eis 'geometrische mogelijkheden').
Van de drie genoemde productiemethoden is het folieblazen (zie ook paragraaf 4.7 en figuur 4.72) de enige methode die geschikt is om een boterhamzakje te maken. Als controle-eis bij het productieproces kunnen we nog meewegen dat er meerdere zakjes op een rol geproduceerd moeten kunnen worden die daarna eenvoudig van elkaar gescheiden moeten kunnen worden. Uit de beschrijving van het folieblaasproces blijkt dat dit inderdaad mogelijk is bij dit proces.

We kunnen voor het boterhamzakje dus vrij eenvoudig een voorstel doen voor een bruikbaar materiaal en een bijpassend productieproces, zonder dat we daarbij exacte eisen aan de geometrie stellen.

Samenvatting

Productiegericht ontwerpen betreft het afstemmen van het productontwerp op de mogelijkheden van het vervaardigen en het monteren van het product. Dit is noodzakelijk vanwege de grote invloed van ontwerpbeslissingen op de kosten en de voortgang van de productie. Productieoverwegingen dienen vroeg bij het ontwerpproces betrokken te worden. Dit kan gerealiseerd worden door het samenhangend en overlappend uitvoeren van productontwerp, werkvoorbereiding, ontwerp en vervaardiging van de productiemiddelen en van de productieplanning.

Criteria die worden gebruikt om de productievriendelijkheid van een ontwerp te bepalen hebben betrekking op de maakbaarheid van het ontwerp. Bepalende grootheden hierbij zijn betrouwbaarheid, capaciteitsbeslag, complexiteit, kosten en tijd.

Productiegericht ontwerpen kan uitgevoerd worden op drie niveaus: productniveau, samenstellingsniveau en onderdeelniveau. Enkele aspecten die een grote rol spelen bij het productiegericht ontwerpen zijn productstructurering, standaardisatie en vormgeving.

Er zijn talloze ontwerpregels. Bijvoorbeeld die met focus op deling, lossendheid en ondersnijding, op wanddikteovergang en afronding, op richtlijnen voor mechanische bewerking en op effecten na de fabricagestap. Door deze regels toe te passen kan de ontwerper de maakbaarheid beïnvloeden.

Bij productontwikkeling dienen vele keuzes te worden gemaakt. Dit complexe proces wordt deels gestuurd door het programma van eisen, met daarin selectie- en controle-eisen. Ter illustratie hebben we in dit hoofdstuk twee voorbeelden behandeld waarbij we de producttermen 'materiaal' en 'proces' selecteerden.

Literatuur

16.1 Roozenburg, N.F.M., Eekels, J., *Productontwerpen, structuur en methoden*, 2e druk, Lemma, 1998, ISBN 978-90-5189-706-7.

16.2 Eger, A.O., Bonnema, G.M., Lutters, D., Voort, M.C. van der, *Productontwerpen*, 4e druk, Lemma, 2010, ISBN 978-90-5931-553-2

16.3 Andreasen, M.M., Kähler, S., Lund, T., Swift, K., *Design for Assembly*, 2e druk, IFS Publications/Springer-Verlag, Kempston, 1988, ISBN 978-0-948507-79-3.

16.4 Boothroyd, G., Dewhurst, P., Knight, W.A., *Product Design for Manufacture and Assembly*, 3rd edition, 2010, CRC Press, ISBN 978-1-4200-8927-1.

16.5 Kalpakjian, S., Schmid, S.R., *Manufacturing Engineering and Technology*, 7th edition (SI), Pearson, 2014, ISBN 978-981-06-9406-7. Geeft, verspreid over het boek, ontwerpregels voor fabricagegericht ontwerpen.

16.6 Bralla, J.G., *Design for Manufacturability Handbook*, McGraw Hill, 1998, ISBN 978-00-7007-139-1.

16.7 Ashby M., Johnson K., *Materials and Design: The Art and Science of Material Selection in Product Design*, 3rd edition, Elsevier, 2014, ISBN 978-00-8098-205-2.

16.8 www.grantadesign.com

Oefenvragen

16.1 Noem de twee belangrijkste aspecten van concurrent engineering. Hoe kan concurrent engineering worden gerealiseerd?

16.2 Beredeneer de samenhang tussen de doorlooptijd van een order en methoden zoals DFM en DFA.

16.3 Voor het monteren van een deksel staan een ontwerper een tweetal alternatieven ter beschikking: 1) montage van een plaatdeel met behulp van een aantal bouten, 2) montage van een kunststof deel door middel van een klikverbinding die geïntegreerd is in het kunststof deel. Evalueer deze alternatieven met betrekking tot onderdelenfabricage, assemblage, logistiek en onderhoud.

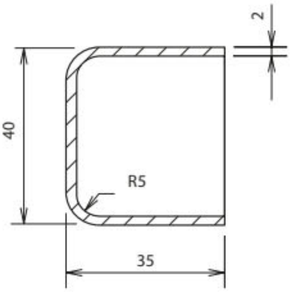
16.4 Wat is de functie van de productstructuur en waar wordt deze voor gebruikt?

16.5 Welke invloed kan een modulaire productopbouw hebben op het productiesysteem?

16.6 Wat is het doel van standaardisatie in het ontwerp van een product?

16.7 Noem de voor- en nadelen van het gebruik van ontwerpregels.

16.8 Vergelijk de minimaal haalbare buigradius van vrij buigen, matrijsbuigen en rolbuigen; zie respectievelijk de figuren 4.31, 4.35 en 4.39. Het plaatonderdeel volgens bijgaande figuur is 800 mm breed. Is het maakbaar met de genoemde buigtechnieken? Is een aanpassing van het ontwerp noodzakelijk om het te kunnen buigen?



Figuur bij oefenvraag 16.8

16.9 Is de manier waarop eisen verdeeld worden over selectie-eisen en controle-eisen objectief? Wat zijn de voor- en nadelen daarvan?

16.10 Bij het kiezen van bijvoorbeeld een materiaal of een productieproces neemt het aantal geschikte mogelijkheden steeds verder af. Zegt de manier waarop dit gebeurt iets over de complexiteit van het product dat ontwikkeld wordt?

inclusief website!

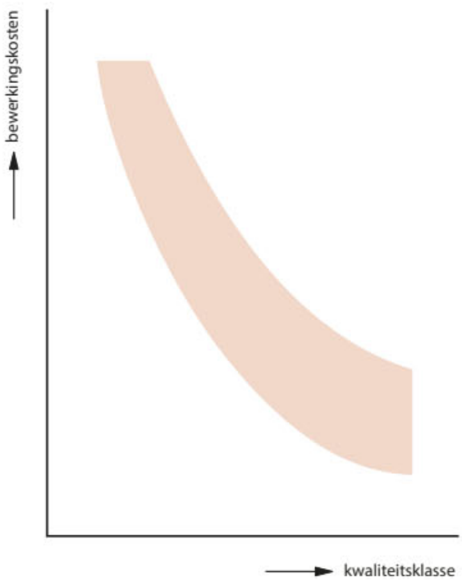
Op www.industrieleproductie.nl vind je de antwoorden op deze vragen, maar ook extra studie- en oefenmateriaal, zoals video's en meer opgaven.

17 Productiekosten

In dit hoofdstuk laten we zien dat gedurende de productiecyclus van een product een groot aantal beslissingen op grond van kosten worden genomen.
We behandelen de diverse kostensoorten en geven aan hoe de productiekostprijs van een productonderdeel en van een geassembleerd product tot stand komt. Ook de opbouw van de uiteindelijke verkoopprijs van een product komt aan de orde.
We geven aan op welke wijze men de uurtarieven van machines en productiemedewerk(st)ers bepaalt.

17.1 Inleiding

In de hoofdstukken 3 tot en met 8 van het boek hebben we de belangrijkste vormgevingsprocessen behandeld. In hoofdstuk 14 kwam de taak van de productievoorbereiding aan de orde. Bij de ontwikkeling van een nieuw product of een familie van nieuwe producten zal de productievoorbereiding de meest geschikte fabricagemethode moeten zien te vinden. Bij een vergelijking van de in aanmerking komende fabricagemethoden spelen de criteria uit paragraaf 1.7 een rol. In het bijzonder de productiekostprijs van het product is daarbij van groot belang. Om deze reden besteden we in dit hoofdstuk aandacht aan diverse kostprijsaspecten.



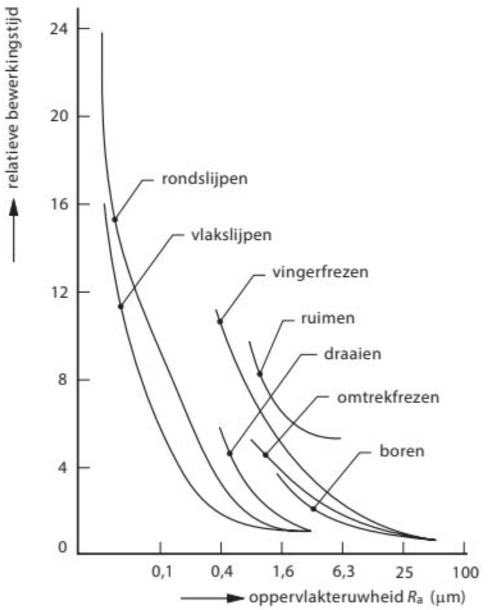
Figuur 17.1 Relatie tussen de kwaliteitsklasse en de bewerkingskosten

Figuur 1.6 laat zien dat het grootste gedeelte van de voortbrengingskosten van een product reeds in de ontwerpfase wordt vastgelegd. Een optimalisatie van de productiekosten alleen leidt dus niet automatisch tot een concurrerende productprijs! Deze is alleen bereikbaar wanneer er gedurende het gehele voortbrengingstraject, dus bij het ontwerp, de productievoorbereiding, de fabricage en assemblage, geïntegreerd naar minimale kosten wordt gestreefd. Hoge kosten voor complexe onderdelen kunnen bijvoorbeeld ruimschoots worden gecompenseerd door veel lagere assemblagekosten.
In steeds meer gevallen geeft men bij de opstelling van de ontwerpeisen een maximum toelaatbare kostprijs als taakstelling op.

Het uitgangspunt voor de bepaling van de meest geschikte fabricagemethode van een productonderdeel is het ontwerp. Hierin zijn niet alleen de vereiste maat-, vorm-, plaats- en oppervlaktetoleranties voorgeschreven, maar dikwijls ook de vereiste materiaalstructuur en de mechanische eigenschappen.
In veel gevallen zullen er verschillende mogelijkheden zijn om een onderdeel overeenkomstig de ontwerpeisen te vervaardigen. Een tandwiel voor een tandwielpompje kan bijvoorbeeld worden vervaardigd door frezen, koudomvormen, fijnstansen of sinteren. Er zullen dus keuzen gemaakt moeten worden!

In een kostenvergelijking tussen verschillende vervaardigingsmethoden moet men de **materiaalkosten** en de **bewerkingskosten** (alle kosten die samenhangen met de fabricage) meenemen.

De materiaalkosten van een onderdeel zijn sterk afhankelijk van de hoeveelheid afval die bij het bewerkingsproces ontstaat, bijvoorbeeld in de vorm



Figuur 17.2 Verband tussen de relatieve bewerkingstijd en de haalbare oppervlaktekwaliteit

van te verwijderen gietsystemen, opkomers, bramen of spanen.
De bewerkingskosten worden in belangrijke mate beïnvloed door de vereiste toleranties en oppervlaktekwaliteit. De bewerkingskosten nemen sterk toe bij een verkleining van de toleranties en/of een verlaging van de oppervlakteruwheid van een werkstuk. Het gearceerde gebied in figuur 17.1 laat zien binnen welke grenzen de bewerkingskosten als functie van de kwaliteitsklasse van het werkstuk kunnen veranderen. De in de figuur aangegeven kwaliteitsklasse wordt bepaald door de maat-, vorm- en plaatstoleranties, en door de oppervlaktekwaliteit. In figuur 17.2 hebben we voor een aantal verspanende bewerkingen de relatie aangegeven tussen de bewerkingstijd en de in die tijd haalbare oppervlaktekwaliteit. Vaak blijkt het raadzaam om een duurdere voorbewerking uit te voeren, omdat daardoor één of meer nabewerkingen kunnen worden uitgespaard.

Bij de bepaling van de productiekostprijs en de productverkoopprijs dient men uit te gaan van een **bedrijfsstrategie**. Afhankelijk van deze strategie zijn meerdere oplossingen mogelijk, en het is kenmerkend voor goed ondernemerschap deze strategie verstandig aan de omstandigheden aan te passen.
Bij de berekening van de bewerkingskosten kan men van een gemiddeld werkplaatstarief uitgaan. Men spreekt dan wel van de bepaling van de **globale kosten**. Het nadeel hiervan is echter dat er geen concrete informatie beschikbaar komt over welk type werk extra geld oplevert en op welk type werk feitelijk geld wordt toegelegd. Bij het werken met **gedifferentieerde kosten** wordt dit wel duidelijk. De calculatie is in dat geval echter complexer.

Een ander onderscheid is de wijze waarop algemene kosten als **indirecte kosten** of **overheadkosten** in de kostprijs en verkoopprijs worden doorberekend. In paragraaf 17.2 behandelen we dit voor een veel gevolgde bedrijfsstrategie; er zijn echter verschillende andere benaderingswijzen mogelijk.

De keuze tussen verschillende fabricagemogelijkheden wordt in belangrijke mate bepaald door de **seriegrootte**. In het geval dat een serie herhaald wordt, speelt zowel de grootte van de **fabricageserie** als de grootte van de **totaalserie** een rol. Bepaalde kosten kunnen over de totaalserie worden afgeschreven, andere kosten moeten bij het opstarten van een nieuwe fabricageserie opnieuw worden gemaakt (zie paragraaf 17.2.1).
Bij de fabricage van een nieuw 'eigen' product is het vaak lastig om de grootte van de totaalserie betrouwbaar in te schatten; het is dan immers nog onbekend hoe de markt het product zal ontvangen.

Indien een onderdeel op meerdere wijzen gemaakt kan worden, kiest men in het algemeen voor een bepaalde fabricagemethode op basis van **kostenoptimalisatie**. Ook bij de machinekeuze is kostenoptimalisatie vaak leidend. Wanneer een serie draaiwerkstukken bijvoorbeeld op een handbediende centerdraaimachine, een nokkengestuurde draaiautomaat en een NC-draaicentrum gemaakt kan worden, zal in het algemeen gekozen worden voor de machine waarbij de fabricagekostprijs het laagst is. In de praktijk zal men echter niet altijd het criterium van de minimale productiekosten hanteren; zo zal in sommige gevallen een minimale doorlooptijd worden nagestreefd, of een optimale machinebezetting.

Verder dienen we te vermelden dat een te starre proces- of machinekeuze op grond van een minimale productiekostprijs tot een onevenwichtige machinebezetting kan leiden. Stel dat een serie draaiwerkstukken op een NC-draaicentrum 10% goedkoper vervaardigd kan worden dan op een revolverautomaat. Het draaicentrum is echter volgepland met

ander werk en de revolverautomaat heeft slechts een bezettingsgraad van 40%. Dan dient men de kostenvergelijking aan te passen. Aan het uitvoeren van het werk op het volgeplande draaicentrum zijn namelijk extra overwerkkosten verbonden, en de 60% stilstand van de revolverautomaat brengt ook kosten met zich mee.

Ook bij de beslissing om de fabricage van bepaalde werkstukken uit te besteden (zie paragraaf 14.3.1), is de fabricagekostprijs van belang. De overheadkosten van ‘make’- en ‘buy’-onderdelen zullen in het algemeen niet even groot zijn. De wijze waarop men hier rekening mee houdt, maakt ook weer deel uit van de bedrijfsstrategie. In paragraaf 17.5 gaan we dieper in op ‘make-or-buy’-beslissingen.

Meestal vindt in verschillende stadia van het voortbrengingstraject van een product een **kostprijscalculatie** plaats. Bij het uitbrengen van een offerte zal op grond van het voorontwerp (zie paragraaf 15.3.2) een **offertecalculatie** gemaakt worden. De materiaal- en bewerkingskosten worden aan de hand van een productanalyse globaal berekend en het ontwerp zelf is vaak nog niet definitief. Na de orderacceptatie en de definitieve uitwerking van het ontwerp vindt een **voorcalculatie** plaats. De afdeling werkvoorbereiding stelt een bewerkingsplan op. Op basis daarvan schat men de te verwachten bewerkings- en behandelingstijden zo goed mogelijk in en berekent men de hiermee samenhangende productiekosten. Nadat het product gereed is, kan men een **nacalculatie** uitvoeren op grond van de vastgelegde bewerkingstijden en de werkelijk gemaakte kosten.

17.2 Kostensoorten en kostenopbouw

17.2.1 Opbouw van de productiekostprijs van een productonderdeel

Bij de vervaardiging van een fabricageserie van X onderdelen, deel uitmakend van een totaalserie van Y onderdelen, is de productiekostprijs opgebouwd uit de volgende kostenfactoren:

a **Uitvoeringskosten** (zie paragraaf 17.2.2).
Deze kosten K_U komen voor ieder product terug. Voorbeelden van dergelijke kosten zijn:
- materiaalkosten per onderdeel;
- machinekosten per onderdeel;
- arbeidskosten per onderdeel.

b **Kosten voor herhaalopdrachten** (zie paragraaf 17.2.3).
De kosten voor herhaalopdrachten K_{HO} zijn voorbereidende kosten die voor iedere fabricageserie opnieuw gemaakt moeten worden. Deze kosten kunnen dus slechts over de X onderdelen van de fabricageserie worden afgeschreven.

c **Voorbereidingskosten** of **eenmalige kosten** (zie paragraaf 17.2.4).
Deze kosten K_{VB} hoeven slechts eenmaal voor de totaalserie te worden gemaakt, en kunnen dan ook over alle Y onderdelen worden afgeschreven. Dit geldt ook wanneer de totaalserie tot stand komt door het met tussenpozen herhalen van meerdere fabricageseries.

d **Indirecte kosten** voor productiefaciliteiten (overheadkosten, zie paragraaf 17.2.6).
De kosten van alle afdelingen en faciliteiten die niet direct productiegebonden (maar wel productieondersteunend) zijn. Deze kosten dienen op een of andere manier in de prijs van de gefabriceerde producten en onderdelen te worden doorberekend.
Denk hierbij aan afdelingen als inkoop, planning, werkvoorbereiding en expeditie, en aan voorzieningen als gebouwen, verwarming en verlichting. De toeslag voor de verrekening van de algemene kosten van de fabricageafdelingen brengt men in rekening door de nominale fabricagekosten te vermenigvuldigen met de **overheadfactor fabricage** F_{OF} (>1).

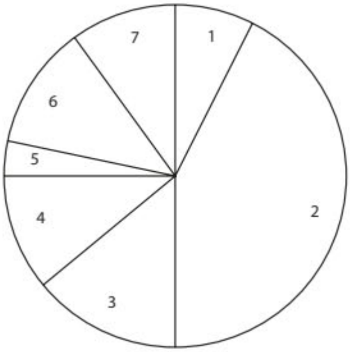
De **productiekostprijs** K_{Fi} van een onderdeel uit de fabricageserie ‘i’ kan als volgt in formulevorm worden weergegeven:

$$K_{Fi} = F_{OF} \times \left(K_U + \frac{K_{HO}}{X_i} + \frac{K_{VB}}{Y} \right) \text{ met } Y = \sum_{i=1}^{k} X_i$$

In de praktijk zullen de fabricageseries X_i niet altijd even groot zijn. In de formule zie je de invloed hiervan op de productiekostprijs K_{Fi} duidelijk terug.

17.2.2 Uitvoeringskosten

Bij de bepaling van de uitvoeringskosten K_U voor de fabricage van een onderdeel, ook wel de **repeterende kosten** genoemd, spelen de volgende kostenfactoren een rol:



Figuur 17.3 Voorbeeld van kostprijsopbouw van een product

a **Materiaalkosten**

In de kostprijsopbouw van een product leveren de materiaalkosten veelal de grootste bijdrage. Bij kleinseriefabricage is het aandeel van de materiaalkosten vaak al circa 50% (zie figuur 17.3) en bij massafabricage kan dit nog beduidend hoger zijn. Figuur 17.4 geeft een overzicht van de kostprijs van veelgebruikte materialen, zowel per eenheid van massa als per eenheid van volume. De kiloprijs van het uitgangsmateriaal is niet alleen afhankelijk van de samenstelling, maar ook van de vorm. De materiaalkosten K_{MAT} per onderdeel bepaalt men door de gemiddeld in totaal benodigde materiaalhoeveelheid per onderdeel te vermenigvuldigen met de materiaalprijs k_{MAT} per massa-eenheid.

Materiaal	€/kg	€/dm³
constructiestaal, plaat, warmgewalst (+ gebeitst)	1,80	14,10
constructiestaal, warmgewalste ronde staf	2,40	18,80
machinestaal, warmgewalste ronde staaf	3,00	23,70
roestvast staal (austenitisch), warm- of koudgewalste plaat	9,20	73,60
roestvast staal (austenitisch), warmgewalste ronde staf	6,50	52,00
grijs gietijzer (broodjes)	0,65	4,70
aluminium, plaat met dieptrekkwaliteit	9,80	26,50
aluminium, geëxtrudeerde ronde staf	9,20	24,90
messing (CuZn37), plaat, halfhard	22,80	196,10
automatenmessing (CuZn39Pb3), ronde staf	22,20	191,00
brons (CuSn7ZnPb), ronde staf	17,40	154,90
titanium, ronde staf	25,00	112,50
PVC, harde plaat, geperst	8,40	12,20
PVC, ronde staf	9,20	13,40
nylon (PA6), gegoten plaat	17,00	19,60
nylon (PA6), geëxtrudeerde staf	22,50	25,90

Figuur 17.4 Richtprijzen van materialen voor 2017, exclusief btw, afhankelijk van de afmetingen en de afnamehoeveelheid

Hierbij dient men rekening te houden met het **afval** dat bij de bewerking ontstaat. Dit wordt meestal in een percentage uitgedrukt. Bij gieten ontstaat afval in de vorm van gietsystemen en opkomers, bij smeden in de vorm van bramen, bij plaatbewerking in de vorm van overtollig plaatmateriaal en bij verspanen in de vorm van spanen. In figuur 17.5 hebben we het globale afvalpercentage V'_{AF} voor enkele bewerkingsprocessen weergegeven. In sommige gevallen kunnen deze percentages nog veel hoger zijn dan we in de tabel hebben aangegeven. Het verkregen afval vertegenwoordigt meestal een **restwaarde** die sterk afhankelijk is van de vorm en de plaats waar het beschikbaar komt. Binnen de gieterij wordt het afval direct gerecirculeerd en heeft het per kilo vrijwel dezelfde waarde als het ingekochte materiaal. Dit wil overigens niet zeggen dat het 'produceren' van afval hier niets kost; het verzamelen, sorteren en opnieuw smelten kost wel degelijk geld. De waarde van metaalspanen is soms nog maar enkele procenten van de waarde van het uitgangsmateriaal. Wanneer de restwaarde aanzienlijk is, zullen de berekende materiaalkosten hiervoor worden gecorrigeerd. Dit is bijvoorbeeld het geval bij koper en koperlegeringen. In andere gevallen moet men rekening houden met **afvoerkosten**.

Uitgaande van een bruto werkstukvolume V_{MAT}, een soortelijke massa ρ, een restwaarde k_R per kg en afvoerkosten k_{AFV} per kg, kunnen de materiaalkosten K_{MAT} als volgt in formulevorm worden uitgedrukt:

Bewerkingsproces	Afvalpercentage V'_{AF} (%)
verspanende processen	10 - 60
gieten in zand	40 - 50
plaatbewerkingsprocessen	10 - 25
extrusie en smeden	10 - 25
spuitgieten	10 - 50
poedermetallurgie	< 10

Figuur 17.5 Overzicht van afvalpercentages

$$K_{MAT} = V_{MAT} \times \rho \times [k_{MAT} - V'_{AF} \times (k_R - k_{AFV})]$$

b **Machinekosten**
De machinekosten K_{Mi} voor één bewerking aan een productonderdeel vindt men door de cyclustijd van de bewerking te vermenigvuldigen met het **machine-uurtarief** M_{1i}. De berekening van het machine-uurtarief lichten we verder toe in paragraaf 17.3.1. De cyclustijd t_C van een bewerking is samengesteld uit de hoofdtijd t_H en de som van de cyclische neventijden t_{Ni}, zodat geldt:

$$t_C = t_H + \sum_{i=1}^{j} t_{Ni}$$

De hoofdtijd wordt gebruikt voor de feitelijke bewerking op de machine. Gedurende de neventijden vinden de overige cyclische handelingen plaats, zoals het instellen van de machine, het op- en afspannen van werkstukken, sledeverplaatsingen zonder dat er gesneden wordt, meten, wisselen van gereedschap enzovoort. Indien een onderdeel op m verschillende machines vervaardigd wordt, geldt voor de totale machinekosten K_{Mt}:

$$K_{Mt} = \sum_{i=1}^{m} \left(t_{Ci} \times M_{1i} \right)$$

c **Directe arbeidskosten**
De directe arbeidskosten of menskosten K_A voor één bewerking aan een productonderdeel worden op vergelijkbare wijze bepaald als de machinekosten. Men vermenigvuldigt de voor de bewerking benodigde cyclustijd met het betreffende **mens-uurtarief** M_2. De berekening van dit tarief werken we in paragraaf 17.3.2 verder uit. In de praktijk rekent men vaak met een gecombineerd **mens-machine-uurtarief**. Wanneer een machine gemiddeld door a mensen wordt bediend, dan is het mens-machine-uurtarief M_T gelijk aan:

$$M_T = M_1 + a \times M_2$$

De waarde van a kan zowel groter als kleiner dan 1 zijn.

d **Gereedschapskosten**
Bij het gebruik van universeel gereedschap zal bij de samenstelling van de uitvoeringskosten voor iedere bewerking ook een deel van de gereedschapskosten in rekening gebracht moeten worden. Wanneer bijvoorbeeld bij snijdend gereedschap de gereedschapskosten voor een scherpe snijkant K_{GS} bedragen en het gereedschap bij de instelling van het proces een standtijd T heeft bij een hoofdtijd t_H, dan geldt voor de gereedschapskosten K_G per bewerking:

$$K_G = K_{GS} \times \frac{t_H}{T}$$

Een gereedschap met een nieuwwaarde K_{NW} kan in het algemeen een aantal malen worden gereconditioneerd, bijvoorbeeld door naslijpen of napolijsten.

Bij een gereedschap dat b maal gereconditioneerd wordt met K_{REC} als reconditioneringskosten en dat uiteindelijk een restwaarde K_R overhoudt, kunnen de gereedschapskosten per snijkant K_{GS} als volgt worden bepaald:

$$K_{GS} = \frac{\left(K_{NW} - K_R\right) + b \times K_{REC}}{b+1}$$

Bij het gebruik van productgebonden gereedschap zullen de gereedschapskosten als eenmalige kosten over de totaalserie moeten worden afgeschreven. In figuur 17.6 laten we een overzicht zien van de aanschafprijs van een aantal zeer gangbare gereedschappen. De kosten voor het naslijpen van een snelstalen spiraalboor van Ø 25 mm bedragen ongeveer € 5,00 exclusief btw, en die voor het naslijpen van een vingerfrees van Ø 20 mm circa € 8,50 exclusief btw. Bij snelstalen standaardgereedschap ligt de standtijd rond de 1 à 2 uur. De snijkant van hardmetalen wisselplaatjes heeft onder optimale verspaningscondities een standtijd van circa 10 minuten.

Gereedschap	Aanschafprijs (€)
snelstalen draaibeitel	20 - 50
beitelhouder voor wisselplaatjes	60 - 180
gecoat hardmetalen wisselplaatje met 3 of 4 snijkanten	6 - 15
keramisch wisselplaatje	12 - 20
boriumnitride (CBN) wisselplaatje	20 - 60
wisselplaatje met diamanten punt	40 - 110
snelstalen spiraalboor Ø 12 mm	10 - 30
snelstalen vingerfrees Ø 20 mm	30 - 60
hardmetalen vingerfrees Ø 20 mm	100 - 175
vlakfrees Ø 100 mm met 6 - 9 hardmetalen wisselplaatjes	300 - 600
eenvoudig productgebonden ponsgereedschap	~ 5.000
productgebonden volgstempel	> 50.000

Figuur 17.6 Aanschafprijzen van gereedschappen, exclusief btw

e **Gereedschapswisselkosten**
Wanneer gereedschap tijdens de fabricage van een serie onderdelen zijn standtijd bereikt, zal dit gewisseld moeten worden. De hiermee samenhangende gereedschapswisselkosten maken deel uit van de uitvoeringskosten. De gereedschapswisselkosten per bewerking K_{GW} kunnen als volgt in de gereedschapswisseltijd t_{GW}, het mens-machine-uurtarief M_T, de standtijd T van het gereedschap en de hoofdtijd t_H worden uitgedrukt:

$$K_{GW} = t_{GW} \times M_T \times \frac{t_H}{T}$$

In het algemeen zorgt men ervoor dat het gereedschap niet tijdens de bewerking van een onderdeel hoeft te worden vervangen.
De gereedschapswisseltijd van een draaibeitel bedraagt één of enkele minuten.

De uitvoeringskosten K_U voor de vervaardiging van een onderdeel zijn gelijk aan de som van de materiaalkosten en de bewerkingskosten:

$$K_U = K_{MAT} + K_{BEW}$$

Aangezien de bewerkingskosten zijn samengesteld uit de mens-machinekosten, de gereedschapskosten en de gereedschapswisselkosten, kunnen de uitvoeringskosten K_U voor m deelbewerkingen als volgt in formulevorm worden weergegeven:

$$K_U = K_{MAT} + \sum_{i=1}^{m} \left[M_{Ti} \times t_{Ci} + \frac{t_{Hi}}{T_i} \times \left(K_{GSi} + t_{GWi} \times M_{Ti} \right) \right]$$

17.2.3 Kosten voor herhaalopdrachten

De kosten voor herhaalopdrachten K_{HO} zijn opgebouwd uit:
- **kosten voor** de **administratieve werkvoorbereiding** K_{AWV};
- **inrichtkosten** K_{IN};
- **aanloopkosten** K_{AL}.

$$K_{HO} = K_{AWV} + K_{IN} + K_{AL}$$

Bij een herhaling van de fabricageserie zal de werkvoorbereiding de nodige administratieve handelingen moeten uitvoeren, waaronder het uitschrijven van orderbegeleidingsbonnen. De technische werkvoorbereiding heeft reeds bij de eerste fabricageserie plaatsgevonden; de toen vastgelegde methoden en gegevens kunnen opnieuw worden gebruikt.

Voorbeelden van inrichtkosten op de machine K_{INM} zijn:
- kosten voor het plaatsen van seriegebonden span- en/of bewerkingsgereedschappen op de machine;
- kosten voor het afstellen van een pers met gereedschap;
- kosten voor het uitwisselen van de nokkensets en het afstellen van de aanslagen bij een nokkengestuurde automaat.

Voorbeelden van inrichtkosten buiten de machine K_{INA} zijn:
- kosten voor het voorinstellen van gereedschap op een gereedschapinstelapparaat;
- kosten voor het plaatsen van opspanmiddelen op pallets.

Tijdens het inrichten van de machine door een machinebediende of machinesteller kan de machine niet voor andere werkzaamheden gebruikt worden. De hiermee samenhangende kosten worden dus bepaald door het product van de inrichttijd t_{IN} en het mens-machine-uurtarief M_T. Zeker bij NC-machines met een hoog machine-uurtarief streeft men ernaar om zo veel mogelijk instelwerk buiten de machine te doen. Denk bijvoorbeeld aan het voorinstellen van gereedschap. Voor de totale inrichtkosten K_{IN} kunnen we dus stellen dat:

$$K_{IN} = K_{INA} + K_{INM} = K_{INA} + t_{IN} \times M_T$$

Bij de start van een nieuwe fabricageserie zal men in het algemeen rekening moeten houden met aanloopkosten. Voordat een spuitgietproces bijvoorbeeld goed verloopt, zullen de nodige proefspuitingen moeten worden uitgevoerd. Naar aanleiding daarvan wordt de machine bijgesteld tot er een goed product ontstaat. Deze aanloopkosten zijn onder meer afhankelijk van de aanlooptijd, het mens-machine-uurtarief en de kosten van het 'verspilde' materiaal.

17.2.4 Voorbereidingskosten

Bij de eenmalige voorbereidingskosten K_{VB} dienen we onderscheid te maken tussen:
- **kosten voor technische werkvoorbereiding** K_{TWV};
- **kosten voor productgebonden uitrusting** K_{PU}.

$$K_{VB} = K_{TWV} + \sum_{i=1}^{l} K_{PUi}$$

Ook wanneer de fabricageserie van een bepaald onderdeel met tussenpozen wordt herhaald, hoeft

de technische werkvoorbereiding slechts eenmaal te worden uitgevoerd, in tegenstelling tot de administratieve werkvoorbereiding. De NC-programma's, bijvoorbeeld, worden immers slechts eenmaal gemaakt.
Voorbeelden van productgebonden uitrusting zijn:
- speciaalgereedschappen, zoals gietmodellen, smeed- en spuitgietmatrijzen en elektroden voor zinkvonken;
- productgebonden span- en hulpgereedschappen;
- nokken voor een nokkengestuurde automaat.

17.2.5 Assemblagekosten

Indien een geassembleerd product uit n onderdelen is samengesteld, zal de productiekostprijs K_{Ft} bepaald worden door de productiekostprijs K_{Fi} van de n afzonderlijke onderdelen, en door de kosten van assemblage. Net als bij de onderdelenfabricage bestaan de assemblagekosten K_{AS} per product weer uit uitvoeringskosten, kosten die over de fabricageserie moeten worden afgeschreven en kosten die over de totaalserie moeten worden afgeschreven.
Bij de assemblage van een nieuw product zal men rekening moeten houden met het inleereffect (zie paragraaf 11.4.7). Ter verrekening van de overheadkosten voor de productiefaciliteiten worden ook hier de nominale assemblagekosten K_{AS} met de overheadfactor fabricage F_{OF} vermenigvuldigd.
Voor de productiekostprijs van een geassembleerd product geldt dus:

$$K_{Ft} = F_{OF} \times K_{AS} + \sum_{i=1}^{n} K_{Fi}$$

17.2.6 Indirecte kosten

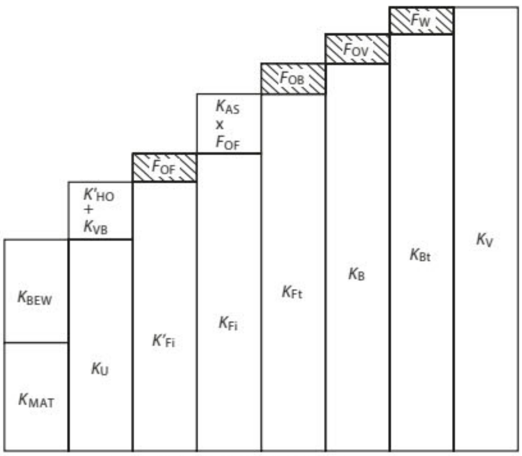
Zoals we reeds in paragraaf 17.2.1 hebben opgemerkt, dienen de kosten van alle niet direct productiegebonden afdelingen als toeslag in de prijs van de gefabriceerde producten te worden doorberekend. Meestal doet men dit met op gemiddelden gebaseerde overheadfactoren. Bij een computerondersteunde bedrijfsvoering kunnen de toeslagen per product meer in detail berekend worden.
Met de indirecte kosten voor productiefaciliteiten, zoals uitgedrukt in de overheadfactor fabricage F_{OF}, worden de algemene kosten van de productieondersteunende afdelingen doorberekend.

De fabricagekostprijs K_{Ft} van het geassembleerde product wijkt in belangrijke mate af van de verkoopprijs K_V. Zoals ook schematisch in figuur 17.7 is weergegeven, moet de fabricagekostprijs nog met de volgende toeslagen worden gecorrigeerd:

a **Overheadfactor bedrijf**
Met de overheadfactor F_{OB} worden de kosten van de afdelingen die zich niet direct met de fabricage bezighouden, doorberekend in de verkoopprijs van het product. Het betreft hier afdelingen als de kwaliteitsdienst, personeelszaken, boekhouding en het management. Voor de bedrijfskostprijs K_B van een product geldt dus:

$$K_B = F_{OB} \times K_{Ft}$$

b **Overheadfactor verkoop**
Met de overheadfactor F_{OV} worden alle kosten die direct samenhangen met de verkoopactiviteiten van het bedrijf, doorberekend in de verkoopprijs van het product. Bij producten die uit voorraad



K_{BEW}	bewerkingskosten (onderdelen)
K_{MAT}	materiaalkosten
$K'_{HO} + K_{VB}$	aandeel kosten voor herhaalopdrachten en voorbereidingskosten
K_U	uitvoeringskosten (onderdelen)
K'_{Fi}	productiekostprijs (zonder overhead)
K_{Fi}	productiekostprijs met overhead voor productiefaciliteiten (onderdelen)
$K_{AS} x F_{OF}$	assemblagekosten incl. overhead voor productiefaciliteiten
K_{Ft}	productiekostprijs (geassembleerd product)
K_B	bedrijfskostprijs
K_{Bt}	totale (bedrijfs)kostprijs
K_V	verkoopprijs
F_{OF}	overheadfactor voor productiefaciliteiten
F_{OB}	overheadfdactor voor algemene bedrijfskosten
F_{OV}	overheadfactor voor verkoopkosten
F_W	winstfactor

Figuur 17.7 Kostprijsopbouw van een product

geleverd worden, maken de voorraadkosten hiervan een belangrijk deel uit.
Ook de kosten voor aflevering van de producten, de nazorg en de eventuele commissies voor wederverkopers zijn in deze factor verdisconteerd. De totale kostprijs K_{Bt} van een product kan dus als volgt worden weergegeven:

$$K_{Bt} = F_{OV} \times K_B$$

Sommige bedrijven berekenen deze verkoopkosten door via de overheadfactor bedrijf F_{OB}.

c **Winstfactor**
In het algemeen is het voor productiebedrijven niet voldoende om kostendekkend te produceren; er zal een zekere winst gemaakt moeten worden. De winstfactor F_W is de verhouding tussen de verkoopprijs van het product en de totale productkosten.

De verkoopprijs van een product kan dus als volgt in formulevorm worden uitgedrukt:

$$K_V = F_W \times K_{Bt} = F_W \times F_{OV} \times F_{OB} \times K_{Ft}$$

17.3 Uurtarieven

17.3.1 Machine-uurtarief

Bij de aanschaf van een nieuwe machine zal men steeds naar de reële kosten voor een bedrijfsklare machine moeten kijken.
Dit betekent dat de **aanschafkosten** K_{NW} zullen moeten worden vermeerderd met de **opstellingskosten** K_{OP} voor de fundatie, plaatsing, aansluitingen en keuring.
Door deze uitgaven verandert het bedrijfskapitaal van een onderneming in feite niet. Het financiële vermogen van het bedrijf neemt weliswaar af, maar het nieuwe productiemiddel gaat door 'activering' tot het bedrijfskapitaal van de onderneming behoren. Figuur 17.8 laat een overzicht zien van de aanschafprijs van een aantal productiemiddelen.

Productiemiddel	Aanschafprijs (k€)
draaimachine	10 - 100
freesmachine	10 - 250
rondslijpmachine	40 - 150
vlakslijpmachine	20 - 100
bewerkingscentrum	100 - 1000
flexibel fabricagesysteem	> 1000
mechanische pers	15 - 250
spuitgietmachine	30 - 250
puntlasmachine	5 - 50
industriële robot (excl. periferie)	25 - 250

Figuur 17.8 Aanschafprijzen van productiemiddelen, exclusief btw

Van de waarde van productiemiddelen wordt jaarlijks een gedeelte afgeschreven. De afschrijftermijn wordt bepaald door de geschatte levensduur van de machine. Hierbij wordt nog onderscheid gemaakt tussen de **technische levensduur** en de **economische levensduur**. De technische levensduur eindigt als de machine versleten is. Aan het einde van de economische levensduur is de machine nog wel bruikbaar, maar (technisch-)economisch achterhaald. De kortste van beide levensduren, aangegeven met L_{MIN}, is maatgevend voor de jaarlijkse afschrijving. In veel gevallen heeft het productiemiddel aan het eind van de afschrijfperiode nog een restwaarde K_R. De jaarlijkse **afschrijvingskosten** M_{Aj} zijn dus gelijk aan:

$$M_{Aj} = \frac{K_{NW} + K_{OP} - K_R}{L_{MIN}}$$

Voor productiemachines wordt dikwijls een afschrijftermijn van 10 jaar gehanteerd.

Het vermogen dat in een productiemiddel is geïnvesteerd moet, evenals geld op de bank, rente opbrengen. De **kapitaalkosten** verbonden aan de investering in een machine bestaan dan ook uit afschrijving en rente. Het kapitaalbeslag van een nieuwe machine zal bij aanschaf gelijk zijn aan $(K_{NW} + K_{OP})$ en met het verstrijken van de afschrijftermijn lineair teruglopen naar de restwaarde K_R. Globaal kan gesteld worden dat de jaarlijkse **rentekosten** M_{Rj} gemiddeld over de helft van de aanschafprijs met opstellingskosten berekend dienen te worden. Bij een rentepercentage P_R geldt dus:

$$M_{Rj} = P_R \times \frac{(K_{NW} + K_{OP})}{2}$$

In de praktijk worden vaak ook andere, complexere, methoden gebruikt voor afschrijving en renteberekening.
Ook de huisvesting van de machine in een gebouw met alle benodigde voorzieningen (denk aan verlichting, verwarming en leidingen voor elektra, lucht en water) kosten geld en dienen door de exploitatie van de machine te worden opgebracht. De rente en afschrijving op het gebouw met voorzieningen worden meestal naar een 'vierkante-meterprijs' omgere-

kend. Deze kosten M_{Hj} per m^2 per jaar (bijvoorbeeld € 150,–/m^2 per jaar) bepalen samen met het aantal vierkante meters H dat het productiemiddel in beslag neemt de **huisvestingskosten** van de machine.

De kapitaalkosten en huisvestingskosten zijn onafhankelijk van het aantal uren dat men de machine per jaar gebruikt. Zij worden daarom **vaste kosten** genoemd. Kosten die lineair toenemen met het aantal gebruiksuren van de machine, noemt men **variabele kosten**. Hieronder vallen bijvoorbeeld energiekosten en kosten voor koel- en smeermiddelen.

Ook de jaarlijkse **onderhoudskosten** voor de machine dienen in het machine-uurtarief te worden doorberekend. In het algemeen wordt hiervoor een toeslagpercentage P_{ON} van de investeringskosten in rekening gebracht. In de praktijk varieert dit percentage tussen de 3% en 6%.

Bij het vaststellen van een machine-uurtarief zullen de jaarlijkse vaste kosten van een machine moeten worden afgeschreven over een geschat aantal nettobedrijfsuren Z op jaarbasis. Het is van wezenlijk belang dat deze taakstelling gehaald wordt. Wanneer het geschatte aantal nettobedrijfsuren niet gehaald wordt, werkt men in feite met een te laag machine-uurtarief en treedt er een **onderbezettingsverlies** op. Een overschrijding van het aantal geschatte uren leidt tot winst. Ook bij een machinebezetting van bijvoorbeeld 50% kan er dus best met winst geproduceerd worden, als het geschatte aantal nettobedrijfsuren daaronder ligt.

Bij de vaste kosten zal nog een post voor de variabele kosten moeten worden opgeteld, namelijk de kosten M_{VAR} per uur voor het gebruik van energie en hulpstoffen, zoals koel- en smeermiddelen, reinigingsmiddelen, lossingsmiddelen, diëlektrica enzovoort. Bij deze verbruiksstoffen zal men ook met afvoerkosten rekening moeten houden, aangezien ze niet zonder meer in het milieu gestort kunnen worden,

Ten slotte wordt het uiteindelijke machine-uurtarief M_1 gevonden door de som van de jaarlijkse afschrijvingskosten, rentekosten, onderhoudskosten en huisvestingskosten te delen door het geschatte aantal nettobedrijfsuren per jaar, en dit bedrag te vermeerderen met de variabele kosten per uur:

$$M_1 = \frac{M_{Aj} + \left(1/2 \times P_R + P_{ON}\right) \times \left(K_{NW} + K_{OP}\right) + M_{Hj} \times H}{Z} + M_{VAR}$$

17.3.2 Mens-uurtarief

Het mens-uurtarief wordt primair bepaald door de loonkosten op jaarbasis, de **sociale lasten** die door de werkgever betaald moeten worden, samen met het **netto-aantal werkuren** per jaar.
De berekening van dit tarief zullen we uitwerken aan de hand van een voorbeeld.

We gaan uit van een CNC-frezer die bruto een bedrag van € 32.500,- per jaar verdient, inclusief 8% vakantietoeslag. Door de werkgever dient nog eens 25% à 30% van deze loonkosten betaald te worden aan premies, pensioenbijdrage, bijscholing, bedrijfskleding enzovoort. De totale kosten op jaarbasis bedragen dus:

Brutoloon per jaar:	€ 32.500,-
Overige werkgeverskosten per jaar:	€ 9.500,-
Menskosten per jaar:	€ 42.000,-

Het aantal werkuren per jaar wordt berekend aan de hand van het aantal werkdagen, dat jaarlijks gelijk is aan:

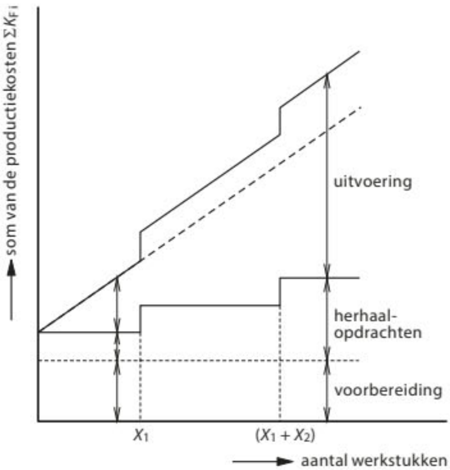
Aantal werkdagen per jaar: 52 × 5 =	260 dagen
Vakantie- en feestdagen:	34 dagen
	226 dagen
Ziekteverzuim (circa 4,0%):	9 dagen
Aantal werkdagen per jaar:	217 dagen

Uitgaande van 38 werkuren per week, oftewel 7,6 uren per dag, zal het aantal werkuren per jaar dus 217 x 7,6 = 1649 uren bedragen. Met deze gegevens zijn de brutoloonkosten per uur te bepalen. Dit bedrag moet nog wel met enkele toeslagen worden gecorrigeerd. In dit voorbeeld gaan we ervan uit dat de frezer 12% van de tijd aan **persoonlijke verzorging** en rust besteedt. Verder worden de kosten van het leidinggevend personeel verwerkt in de vorm van een toeslag, bijvoorbeeld van 20%. In het geval van meerploegendienst dient nog een correctiefactor te worden gehanteerd; bij het werken in drieploegendienst liggen de loonkosten ongeveer 25% hoger dan bij het werken in normale dagdienst.
Het mens-uurtarief M_2 bij het werken in normale dagdienst is in dit voorbeeld gelijk aan:

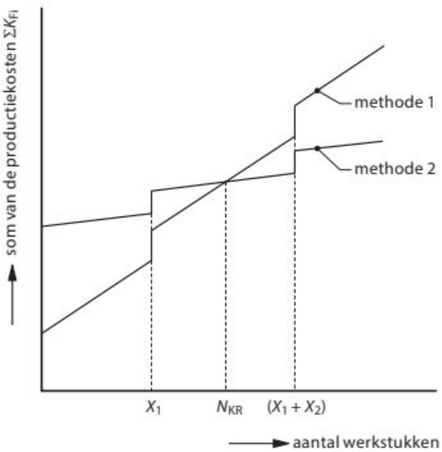
$$M_2 = \frac{1{,}2}{0{,}88} \times \frac{€\ 42.000}{1649} = €\ 34{,}75$$

17.4 Optimalisatie van de productiekostprijs

In paragraaf 17.1 hebben we reeds gesteld dat de uiteindelijke keuze van de meest geschikte fabricagemethode en productiemiddelen in het algemeen een proces van kostenoptimalisatie is. Omdat voor verschillende fabricagemethoden en bewerkingsmachines de eenmalige kosten, de kosten voor herhaalopdrachten en de uitvoeringskosten niet gelijk zijn, zal de vraag welke methode of machine tot de gunstigste productiekostprijs leidt, sterk afhankelijk zijn van de seriegrootte (totaalserie en fabricageserie).



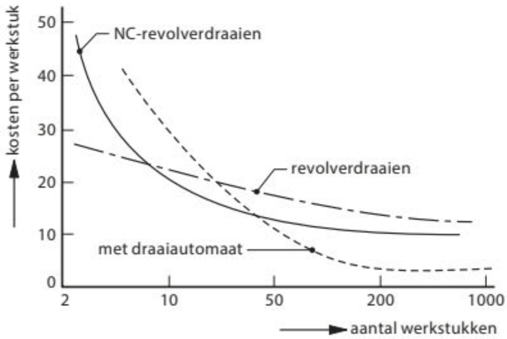
Figuur 17.9 Cumulatieve productiekosten als functie van het aantal gefabriceerde werkstukken



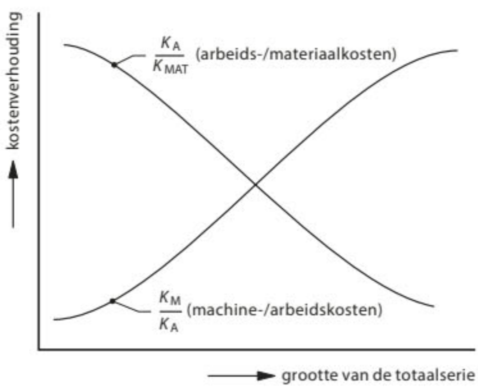
Figuur 17.10 Kostenverloop voor twee verschillende fabricagemethoden

In figuur 17.9 hebben we voor een serie onderdelen die volgens een bepaalde methode vervaardigd zijn, de som van de productiekosten uitgezet als functie van het aantal onderdelen. De kostenkromme in de grafiek is cumulatief samengesteld uit de vaste voorbereidingskosten K_{VB}, de semivaste kosten K_{HO} voor herhaalopdrachten en de variabele uitvoeringskosten K_U.

Figuur 17.10 laat een dergelijk kostenverloop zien voor twee verschillende fabricagemethoden. Methode 1 kenmerkt zich door relatief geringe eenmalige kosten en hogere uitvoeringskosten en kosten voor herhaalopdrachten. Bij methode 2 is dit juist omgekeerd. Bij de fabricage van N_{KR} werkstukken zijn de beide methoden even duur; het bijbehorende aantal producten wordt het **kritisch productaantal** (break-evenpoint) genoemd.



Figuur 17.11 Verloop van de kosten per werkstuk op verschillende typen machines



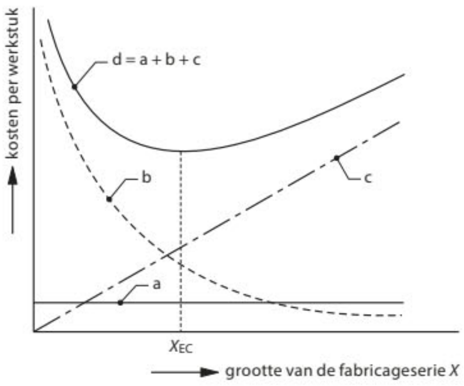
Figuur 17.12 Vergelijking van arbeids-, materiaal- en machinekosten als functie van het productievolume

Bij aantallen kleiner dan N_{KR} zal voor methode 1 gekozen worden, en bij aantallen groter dan N_{KR} voor methode 2.

We kunnen het effect van de seriegrootte ook illustreren met een grafiek waarin de productiekostprijs per werkstuk is uitgezet tegen de seriegrootte. In figuur 3.37 hebben we dit reeds gedaan voor het gieten en smeden van een drijfstang, waarbij de fabricageserie gelijk is aan de totaalserie. In verband met de hoge matrijskosten wordt smeden hier pas bij meer dan 20.000 onderdelen goedkoper dan gieten in zand. In figuur 17.11 hebben we op vergelijkbare wijze in één grafiek de kostenkrommen weergegeven voor een handbediende revolverdraaimachine, een NC-revolverdraaimachine en een draaiautomaat.

Als algemene regel kunnen we stellen dat de productiekostprijs per werkstuk afneemt wanneer het productievolume toeneemt. Dit is een gevolg van het feit dat het aandeel van de gereedschapskosten en machinekosten in de fabricagekostprijs geringer wordt.

Een andere algemene trend is dat bij een toenemend productievolume het aandeel van de directe loonkosten in verhouding tot de materiaalkosten kleiner wordt. Tegelijkertijd neemt het aandeel van de machinekosten in verhouding tot de directe loonkosten juist toe (zie figuur 17.12).



a vaste voorraadkosten
b kosten voor herhaalopdrachten per werkstuk (K_{HO}/X)
c variabele voorraadkosten
d totale kosten per werkstuk

Figuur 17.13 Bepaling van de economische seriegrootte

Bij een bedrijf dat een 'eigen' product uit voorraad levert en dus op voorraad produceert, is de grootte van de fabricageserie vrij te kiezen. De optimale grootte van deze serie wordt weer door kostenoptimalisatie gevonden. In dit geval zorgt men ervoor dat de voorraadkosten en de met de productie samenhangende kosten tezamen minimaal zijn. Dit leidt dan tot de **economische seriegrootte** X_{EC} (zie figuur 17.13).

17.5 Make-or-buy-beslissingen

Bij de bepaling van de meest geschikte fabricagemethode die aan de gestelde eisen voldoet, kan **uitbesteden** een goede optie zijn. In paragraaf 14.3.1 hebben we reeds toegelicht dat **make-or-buy-beslissingen** door de afdeling werkvoorbereiding worden genomen. Bij de beslissing om bepaalde bewerkingen of de fabricage van bepaalde onderdelen of zelfs samenstellingen uit te besteden, spelen niet alleen kostenaspecten een rol, maar ook andere factoren. Ook de uitgangssituatie is van belang. Heeft het betreffende bedrijf behoefte aan uitbreiding of vervanging van de eigen productiecapaciteit, of is het op zoek naar uitbesteding van een specialisatie die het zelf niet 'in huis' heeft?

Veel productiebedrijven besteden bepaalde specialistische bewerkingen uit aan toeleveringsbedrijven. Het gaat dan om vooral bewerkingen die een forse investering vragen in equipment en milieuvoorzieningen, en om bewerkingen waarvoor bijzondere kennis en/of ervaring nodig is. Zo worden gietwerk, oppervlakte- en warmtebehandelingen meestal bij toeleveranciers ondergebracht. Bedrijven die zich zo veel mogelijk op hun kernactiviteiten ('corebusiness') willen focussen, besteden ook vaak een (groot) gedeelte van hun onderdelenfabricage uit, soms wel tot meer dan 90%. Zelf richten ze zich dan zo veel mogelijk op het ontwikkelen, samenbouwen en verkopen van hun 'eigen' producten. In de automobielindustrie vind je veel van dergelijke bedrijven. Er zit natuurlijk een zeker risico aan de afhankelijkheid van toeleveranciers op het gebied van technische knowhow, kwaliteitszorg en leverbetrouwbaarheid. Daarom sluit een bedrijf vaak een strategische alliantie met zijn toeleveranciers. Bovendien kiest men er dikwijls voor om de meest cruciale bewerkingen toch zelf uit te voeren. Denk bijvoorbeeld aan de vervaardiging van de scheerkoppen van een elektrisch scheerapparaat.

Kosten	Zelf maken (20.000 stuks)		Kopen
	Gehele serie (in €)	Per werkstuk (in €)	Per werkstuk (in €)
Variabele kosten			
- Inkoopprijs			15,–
- Overheadkosten inkoop			3,–
- Materiaalkosten	160.000,–	8,00	
- Kosten machinebedienden	110.000,–	5,50	
- Overheadkosten fabricage	50.000,–	2,50	
Totaal variabele kosten	320.000,–	16,00	18,00
Vaste kosten			
- Productiemiddelen (incl. huisvesting)	140.000,–	7,00	
- Overheadkosten fabricage (incl. supervisie)	40.000,-	2,00	
Totaal productiekosten	500.000,–	25,00	

Figuur 17.14 Gegevens voor het 'make-or-buy'-voorbeeld

Een combinatie van in eigen bedrijf produceren en uitbesteden biedt een interessante oplossing in het geval van afzetpieken. Men kan op afzetpieken reageren door te investeren in structurele overcapaciteit en/of door voorraden aan te houden. Dit zijn allebei dure oplossingen, uitbesteding is in dit geval goedkoper. Men wentelt hierbij het risico van onderbezetting in feite af op de leverancier.

Bij een kostenvergelijking tussen productie in eigen bedrijf en uitbesteden kunnen de overheadkosten al snel tot een verkeerde conclusie leiden. Stel dat de productiekostprijs van een samenstelling € 150,- bedraagt, inclusief € 40,- overheadkosten. Een aanbod van een toeleverancier om dit onderdeel voor € 125,- te leveren, lijkt dan aantrekkelijk. Bij deze inkoopprijs van € 125,- komen echter nog bestelkosten, transportkosten, overheadkosten voor keuring enzovoort. Stel dat deze bijvoorbeeld € 35,- bedragen, dan blijkt zelf produceren toch goedkoper te zijn.

Als voorbeeld kijken we naar een bedrijf dat zelf een bepaald onderdeel met een geschatte benodigde jaarproductie van 20.000 stuks vervaardigt en hierover de vaste kosten afschrijft. Deze vaste kosten hebben we samen met de variabele kosten weergegeven in figuur 17.14. Tijdens de tweede helft van het jaar blijkt dat de vraag vanuit de markt is toegenomen. Een toeleverancier biedt op dat moment aan het betreffende onderdeel voor € 15,- te leveren. Laten we eens analyseren of dit een interessant aanbod is:

Bij aankoop van de onderdelen van de toeleverancier zal nog € 3,- per stuk aan inkoopkosten in rekening gebracht moeten worden (zie figuur 17.14). De totaalprijs wordt dus € 15,- + € 3,- = € 18,- per stuk. De productiekostprijs van de eerste 20.000 onderdelen bedraagt € 500.000,-/20.000 stuks = € 25,- per stuk. Wanneer er echter meer dan 20.000 onderdelen gemaakt gaan worden, dan zijn de vaste kosten reeds afgeschreven en kunnen de volgende onderdelen voor de **marginale kosten** geproduceerd worden. Dat wil zeggen: voor € 320.000,-/20.000 = € 16,- per stuk. Hieruit blijkt dat het goedkoper is om de vervolgserie(s) niet bij de toeleverancier te bestellen,maar zelf te vervaardigen.

Stel nu dat de offerteprijs van de toeleverancier van begin af aan gegolden zou hebben, zou het dan aantrekkelijker geweest zijn alle onderdelen bij de toeleverancier te bestellen voor € 15,00? In dat geval moet je bedenken dat de vaste kosten van de aanwezige eigen productiemiddelen hoe dan ook betaald moeten worden, of ze nu wel of niet worden gebruikt. Dat betekent dus dat de feitelijke kostprijs van de eerste 20.000 onderdelen € 15,- + € 3,- + € 180.000/20.000 = € 27,00 zou zijn. Ook dat is minder interessant dan zelf produceren voor € 25,00 per stuk.

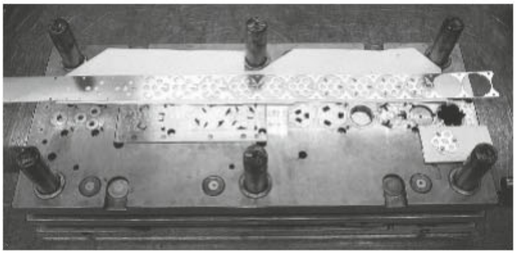
Ten slotte kunnen we bepalen vanaf welk aantal onderdelen N_{KR} bestellen bij de toeleverancier wél goedkoper is. Dit noemt men het break-evenpoint (zie ook paragraaf 17.4). Op het break-evenpoint is de totaalprijs van de bestelling bij de toeleverancier precies gelijk aan de som van de vaste kosten en de variabele kosten bij zelf produceren. Oftewel:

$$(15+3)\times N_{KR} = 180.000 + 16\times N_{KR} \rightarrow 2\times N_{KR} = 180.000$$

Het wordt dus pas vanaf een productaantal van 90.000 goedkoper om alle onderdelen bij de toeleverancier te bestellen.

17.6 Uitgewerkte voorbeelden

In deze paragraaf werken we een tweetal voorbeelden uit. In paragraaf 17.6.1 berekenen we de productiekostprijs van een gestanst onderdeel. Dit kan



Figuur 17.15 Ondermatrijs met geperst plaatonderdeel

worden gezien als een karakteristiek voorbeeld van massafabricage. De gehanteerde prijsgegevens zijn door het bedrijf dat de desbetreffende onderdelen vervaardigt ter beschikking gesteld. Ze zijn daarmee zeer reëel, zij het enigszins verouderd. In paragraaf 17.6.2 hebben we voor het onderdeel uit figuur 14.26 de meest geschikte bewerkingsmethode geselecteerd op basis van bewerkingskosten.

17.6.1 Bepaling van de productiekostprijs van een geperst onderdeel

Het plaatonderdeel uit figuur 17.15 wordt geperst uit bandmateriaal van 0,38 mm dik en 48,6 mm breed op een 800 kN pers, die 8000 slagen per uur kan maken. De totaalserie bestaat uit 28 miljoen stuks en jaarlijks worden $4{,}8 \times 10^6$ onderdelen vervaardigd. Omdat gedurende het gehele jaar hetzelfde onderdeel op de pers gemaakt wordt, zijn omstelkosten en dergelijke niet aan de orde. Na het persen worden de onderdelen in een wasinstallatie van bramen en overtollig smeermiddel ontdaan. De productiekostprijs is in dit geval opgebouwd uit materiaalkosten, gereedschapskosten, machine- en arbeidskosten voor het persen en de nabewerking (wassen), en overheadkosten.

Het materiaal, met een soortelijke massa van $\rho =$ 7800 kg/m^3, wordt aangevoerd met een opschuiflengte van $l = 46{,}9$ mm. De netto massa van het onderdeel bedraagt 2,56 gr. Het bandmateriaal kost € 5,90/kg en de schrootprijs is € 0,60/kg. In verband met beschadigingen en dergelijke rekent men met een uitvalspercentage van 4,2%. Op de materiaalkosten wordt een toeslag van 5,5% doorberekend om de kosten voor inkoop, keuring en opslag te verdisconteren. Uit al deze gegevens volgt voor de benodigde massa m van het uitgangsmateriaal per werkstuk:

$$m = \rho \times l \times b \times s =$$
$$7800 \times 46{,}9 \times 48{,}6 \times 0{,}38 \times 10^{-9} = 6{,}76 \times 10^{-3}\ \text{kg}$$

De materiaalkosten K_{MAT} zijn als volgt samengesteld:

- Brutomateriaalkosten:
  $6{,}76 \times 10^{-3} \times$ € 5,90 = € 0,0399
- Correctie voor uitval:
  4,2% × € 0,0399 = € 0,0017
- Toeslag:
  5,5% × (€ 0,0399 + € 0,0017) = € 0,0023

€ 0,0439

- Schrootwaarde:
  $(6{,}76 - 2{,}56) \times 10^{-3} \times 1{,}042 \times$ € 0,60 = € 0,0026

Materiaalkosten K_{MAT}: € 0,0413

Voor de vervaardiging van de totaalserie van 28 miljoen onderdelen zijn ten behoeve van de persgereedschappen de volgende investeringen gedaan:

- Ontwerpen en vervaardigen van een eerste persgereedschap: € 75.500,00
- Vervaardigen van een tweede persgereedschap: € 65.500,00
- Reserveonderdelen: € 15.000,00
- Diverse speciale voorzieningen: € 9.200,00

Totale investering: € 165.200,00

Gereedschapskosten (per onderdeel):

$$K_G = \frac{€\,165.200,-}{28.000.000} = €\,0{,}0059$$

De 800 kN pers met een machine-uurtarief van € 25,75/uur wordt bediend door een machinebediende, waarvoor een mens-uurtarief geldt van € 37,35/uur. Hoewel de pers 8000 slagen/uur kan maken, blijken er gemiddeld circa 6400 onderdelen per uur geperst te worden; het rendement is dus 80%. Het uitvalspercentage bedraagt 3%. Na 28000 persslagen wordt het gereedschap schoongemaakt en nagesteld; dit onderhoud vraagt circa 70 minuten. De mens- en machinekosten voor de persbewerking zijn als volgt samengesteld:

- Machinekosten (pers): $\dfrac{€\,25{,}75}{0{,}97 \times 6400} = €\ 0{,}0041$
- Arbeidskosten (pers): $\dfrac{€\,37{,}35}{0{,}97 \times 6400} = €\ 0{,}0060$
- Onderhoud: $\dfrac{70}{60} \times \dfrac{(€\,25{,}75 + €\,37{,}35)}{0{,}97 \times 28000} = €\ 0{,}0027$

Mens- en machinekosten voor het persen:
€ 0,0041 + € 0,0060 + € 0,0027 = € 0,0128

In de wasinstallatie wordt in 2 minuten een partij van 2000 onderdelen gewassen. Het mens-machine-uurtarief van de installatie bedraagt € 109,50/uur. Er geldt dus:

$$\text{Waskosten: } \frac{2}{60} \times \frac{€\,109{,}50}{0{,}97 \times 2000} = \quad €\ 0{,}0019$$

De overheadkosten voor fabricagefaciliteiten worden in dit geval berekend door een percentage van 29% van de mens- en machinekosten te nemen, en zijn dus gelijk aan:

$$29\% \times (€\,0{,}0128 + €\,0{,}0019) = \quad €\ 0{,}0043$$

Dat de materiaal- en gereedschapskosten in de berekening van de overheadkosten buiten beschouwing gelaten worden, is een kwestie van bedrijfsstrategie.

De uiteindelijke productiekostprijs van de 'snap spring' is dus als volgt opgebouwd:

– Materiaalkosten:	€ 0,0413	(62,4%)
– Gereedschapskosten:	€ 0,0059	(8,9%)
– Bewerkingskosten op de pers:	€ 0,0128	(19,3%)
– Nabewerkingskosten (wassen):	€ 0,0019	(2,9%)
– Overheadkosten:	€ 0,0043	(6,5%)
Totale productiekosten:	€ 0,0662	

17.6.2 Bepaling van de voordeligste bewerkingsmethode

In paragraaf 14.7.2 hebben we drie bewerkingsmethoden behandeld voor de verspanende nabewerking van het messing gietstuk dat in figuur 14.26 is afgebeeld. In een fabricageserie worden 25 onderdelen bewerkt en de totaalserie bestaat uit 400 werkstukken. In de kostprijsvergelijking laten we de kostenposten die voor alle drie methoden (nagenoeg) gelijk zijn buiten beschouwing. Het gaat bijvoorbeeld om de kosten van het te bewerken gietstuk, de gereedschapskosten en de overheadfactor. De productiekostprijs K_F wordt bepaald door de bewerkingskosten K_{BEW}, de kosten voor herhaalopdrachten K_{HO} en de eenmalige voorbereidingskosten K_{VB}.

$$K_F = K_{BEW} + \frac{K_{HO}}{X} + \frac{K_{VB}}{Y}$$

De beschouwde bewerkingsmethoden zijn:
- Methode 1: Conventioneel bewerken met de eerste opspanning op een draaimachine en de overige opspanningen op een freesmachine.
- Methode 2: Bewerken op een NC-draaicentrum.
- Methode 3: Bewerken op een NC-bewerkingscentrum.

De bewerkingskosten K_{BEW} worden bepaald door de cyclustijden en de mens-machine-uurtarieven M_T (zie figuur 17.16). De voor de ideale situatie gecalculeerde cyclustijd t_C wordt vermeerderd met een toeslag voor verlies- en wachttijden, correctie van fouten, etc. In de gegeven situatie wordt van de volgende uurtarieven uitgegaan:

Methode	Machine	M_T (per uur)	t_C	Toeslag
1	draaimachine	€ 36,00	10 min	20%
1	freesmachine	€ 42,00	24 min	20%
2	draaicentrum	€ 75,00	17 min	10%
3	bew.centrum	€ 78,00	14 min	10%

Figuur 17.16 Uurtarieven voor verschillende machines

De kosten voor herhaalopdrachten zijn samengesteld uit de kosten voor de administratieve werkvoorbereiding à € 30,– en de instelkosten. Bij alle machines wordt uitgegaan van een insteltijd van 30 minuten; bij het draaicentrum komt daar nog een extra insteltijd van 30 minuten bij op het moment dat de klauwplaat door een spantang vervangen moet worden.

De eenmalige voorbereidingskosten die in de beschouwing meegenomen worden, zijn:
- Algemene kosten voor de technische werkvoorbereiding (methode 1,2 en 3): € 48,–
- Programmeerkosten (methode 2 en 3): € 168,–
- Productgebonden uitrusting in de vorm van stelstukken:
  - Stelstuk voor methode 1: € 360,–
  - Stelstuk voor methode 3: € 960,–

Methode 1:

$$K_F = 1{,}2 \times \frac{10}{60} \times 36 + 1{,}2 \times \frac{24}{60} \times 42 + \frac{\left(30 + \frac{30}{60} \times 36 + \frac{30}{60} \times 42\right)}{25} + \frac{48 + 360}{400}$$

$$K_F = €\,7{,}20 + €\,20{,}16 + €\,2{,}76 + €\,1{,}02 = €\,31{,}14$$

Methode 2:

$$K_F = 1{,}1 \times \frac{17}{60} \times 75 + \frac{\left(30 + \frac{2 \times 30}{60} \times 75\right)}{25} + \frac{48+168}{400}$$

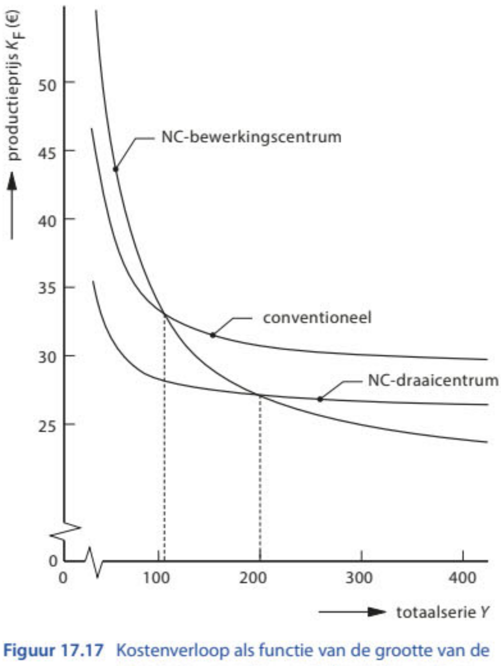
K_F = € 23,38 + € 4,20 + € 0,54 = € 28,12

Methode 3:

$$K_F = 1{,}1 \times \frac{14}{60} \times 78 + \frac{\left(30 + \frac{30}{60} \times 78\right)}{25} + \frac{48+168+960}{400}$$

K_F = € 20,02 + € 2,76 + € 2,94 = € 25,72

Hieruit blijkt dat de nabewerking op het bewerkingscentrum leidt tot de gunstigste productiekostprijs. In figuur 17.17 hebben we de productiekostprijs voor de drie bewerkingsmethoden uitgezet als functie van de grootte van de totaalserie *Y*, uitgaande van een fabricageserie *X* = 25 stuks. Hieruit blijkt dat methode 2 het meest economisch is tot een totaalserie van 200 stuks, en dat daarboven methode 3 voordeliger is. Ga zelf na waarom methode 1 in vergelijking met methode 2 systematisch tot een hogere kostprijs leidt.



Figuur 17.17 Kostenverloop als functie van de grootte van de totaalserie voor drie verschillende bewerkingsmethoden bij een fabricageserie van 25 stuks

17.7 Enkele slotopmerkingen

In de paragrafen 17.2 en 17.3 hebben we aangetoond hoe de productiekostprijs van onderdelen en producten berekend kan worden. In paragraaf 17.4 hebben we aangegeven hoe men met een kostprijsvergelijking tot de meest geschikte proceskeuze en machinekeuze kan komen. Toch dienen we hierover een relativerende opmerking te maken. De formules wekken wellicht de indruk dat een nauwkeurige calculatie mogelijk is. In de praktijk blijken er echter vaak aanzienlijke verschillen op te treden tussen de door verschillende productievoorbereiders berekende tijden en kosten. Een onderlinge afwijking van 100% is zeker geen uitzondering!

De oorzaak van deze onderlinge verschillen moet in de eerste plaats gezocht worden in de toe te passen productiemethode, die weer afhankelijk is van de beschikbare productiemiddelen. In het geval van dezelfde productiemethode kunnen afwijkingen ontstaan door verschillen in de gevoerde bedrijfsstrategie en de gehanteerde uurtarieven. De kennis over en ervaring in kostprijsberekening van de betreffende productievoorbereiders speelt uiteraard ook een rol.

Ten slotte is hier nog een tweede relativerende opmerking op zijn plaats. In paragraaf 17.2 en in het bijzonder in figuur 17.7 hebben we aangegeven hoe de uiteindelijke verkoopprijs door de verschillende kostenfactoren wordt beïnvloed. Marktstrategisch gezien is het echter niet aan te raden om de verkoopprijs van een product eenvoudig vast te stellen als rekensom van de diverse kostenposten en -factoren. Het is veel verstandiger om bij de **prijsstelling** uit te gaan van wat de markt wil betalen. Dit noemen we een **prijsbepaalde kostencalculatie**, in plaats van een **kostenbepaalde prijscalculatie**. Bedrijven die hierin een verkeerde strategie volgen, lopen het risico een wezenlijk deel van hun markt te verliezen, of dienen alsnog aanzienlijke aanpassingen te doen om hun artikelen voor de gedicteerde marktprijs winstgevend te maken.

Samenvatting

De productiekostprijs van een productonderdeel is samengesteld uit de uitvoeringskosten, een aandeel van de kosten voor herhaalopdrachten, een aandeel van de eenmalige voorbereidingskosten en de overheadkosten voor beschikbare productiefaciliteiten. Bij de bepaling van de uitvoeringskosten spelen de materiaalkosten, de machinekosten, de directe arbeidskosten, de gereedschapskosten en de gereedschapswisselkosten een rol. De kosten voor herhaalopdrachten worden bepaald door de kosten van de administratieve werkvoorbereiding, de inrichtkosten en de aanloopkosten. Bij de eenmalige voorbereidingskosten hebben we onderscheid gemaakt tussen de kosten voor de technische werkvoorbereiding en de kosten voor productgebonden uitrusting.

De productiekostprijs van een geassembleerd product is samengesteld uit de productiekostprijs van de afzonderlijke onderdelen en de kosten van assemblage.
De uiteindelijke verkoopprijs, volgens de kostenbepaalde prijscalculatie, wordt bepaald door de productiekostprijs van het geassembleerde product met diverse factoren (overheadfactoren en de winstfactor) te vermenigvuldigen.

Het machine-uurtarief wordt berekend door de som van de jaarlijkse afschrijvingskosten, rentekosten, onderhoudskosten en huisvestingskosten te delen door het geschat aantal netto bedrijfsuren per jaar, en dit bedrag te vermeerderen met de variabele kosten per uur. De bepaling van het mens-uurtarief hebben we toegelicht aan de hand van een rekenvoorbeeld.

De keuze van de meest geschikte fabricagemethode en productiemiddelen is in het algemeen een proces van kostenoptimalisatie. Het uiteindelijke resultaat blijkt sterk afhankelijk van de te vervaardigen seriegrootte.

Bij make-or-buy-beslissingen om bepaalde bewerkingen of de fabricage van bepaalde onderdelen of samenstellingen uit te besteden spelen kostenaspecten en andere factoren een rol. Aan de hand van enkele rekenvoorbeelden hebben we getoond hoe een make-or-buy-beslissing op grond van kosten en productiecapaciteit tot stand komt.

Literatuur

17.1 Brouwers M.P., Koetzier W., *Basisboek bedrijfseconomie*, 10de druk, Noordhoff Uitgevers, 2015, ISBN 978-90-01-82954-4.

17.2 Blommaert, A.M.M., Blommaert, J.M.J., *Bedrijfseconomische analyses*, 8ste druk, Noordhoff Uitgevers, 2016, ISBN 978-90-01-86723-2.

17.3 Mislick G.K., Nussbaum D.A., *Cost Estimation: Methods and Tools*, Wiley, 2015, ISBN 978-1-118-53613-1.

17.4 Sullivan W.G., Wicks E.M., Koelling C.P., *Engineering Economy*, 16th global edition, Pearson Higher Education, 2014, ISBN 978-1-29-201949-9.

17.5 Ostwald P.F., McLaren T.S., *Cost Analysis and Estimating for Engineering and Management*, Pearson, 2004, ISBN 978-0-13-142127-1.

17.6 Plinke W., Rese M., Utzig B.P., *Industrielle Kostenberechnung – Eine Einführung*, 8 Auflage, Springer, 2015, ISBN 978-3-662-46853-1.

Symbolenlijst

Indices:

i	=	Waarde *i* uit een reeks	
j	=	Waarde op jaarbasis	
t	=	Totale waarde	

Symbolen:

a	=	Aantal mensen dat een machine bedient	[-]
b	=	Aantal keren dat een gereedschap wordt nageslepen	[-]
F_{OB}	=	Overheadfactor bedrijf	[-]
F_{OF}	=	Overheadfactor fabricage	[-]
F_{OV}	=	Overheadfactor verkoop	[-]
F_{W}	=	Winstfactor	[-]
H	=	Benodigd oppervlak voor plaatsing van de machine	[m²]
k_{AFV}	=	Afvoerkosten per massa-eenheid	[€/kg]
k_{MAT}	=	Materiaalprijs per massa-eenheid	[€/kg]
k_{R}	=	Restwaarde per massa-eenheid	[€/kg]
K_{A}	=	Arbeidskosten of menskosten	[€]
K_{AL}	=	Aanloopkosten	[€]
K_{AS}	=	Assemblagekosten	[€]
K_{AWV}	=	Kosten voor de administratieve werkvoorbereiding	[€]
K_{B}	=	Bedrijfskostprijs	[€]
K_{BEW}	=	Bewerkingskosten	[€]
K_{Bt}	=	Totale (bedrijfs)kostprijs	[€]
K_{Fi}	=	Productiekostprijs van een onderdeel	[€]
K_{Ft}	=	Productiekostprijs van een geassembleerd product	[€]
K_{G}	=	Gereedschapskosten per bewerking	[€]
K_{GS}	=	Gereedschapskosten per snijkant	[€]
K_{GW}	=	Gereedschapswisselkosten per bewerking	[€]
K_{HO}	=	Kosten voor herhaalopdrachten	[€]
K_{IN}	=	Inrichtkosten	[€]
K_{INA}	=	Inrichtkosten buiten de machine	[€]
K_{INM}	=	Inrichtkosten op de machine	[€]
K_{M}	=	Machinekosten	[€]
K_{MAT}	=	Materiaalkosten	[€]
K_{NW}	=	Nieuwwaarde van een gereedschap of machine	[€]
K_{OP}	=	Bijkomende kosten voor fundatie, aansluiting etc.	[€]
K_{PU}	=	Kosten voor productgebonden uitrusting	[€]
K_{R}	=	Restwaarde van een productiemiddel	[€]
K_{REC}	=	Reconditioneringskosten van een gereedschap	[€]
K_{TWV}	=	Kosten voor technische werkvoorbereiding	[€]
K_{U}	=	Uitvoeringskosten	[€]
K_{V}	=	Verkoopprijs	[€]
K_{VB}	=	Voorbereidingskosten of eenmalige kosten	[€]
L_{MIN}	=	Kortste levensduur van een machine	[jaar]
M_{Aj}	=	Jaarlijkse afschrijfkosten	[€/jaar]
M_{Hj}	=	Jaarlijkse huisvestingskosten per m²	[€/jaar]
M_{Rj}	=	Jaarlijkse rentekosten	[€/jaar]
M_{T}	=	Mens-machine-uurtarief	[€/uur]
M_{VAR}	=	Variabele kosten per uur	[€/uur]
M_{1}	=	Machine-uurtarief	[€/uur]
M_{2}	=	Mens-uurtarief	[€/uur]
N_{KR}	=	Kritische seriegrootte	[-]
P_{ON}	=	Toeslagpercentage voor onderhoudskosten	[%]
P_{R}	=	Rentepercentage	[%]
Q	=	Jaarproductie	[aantal/jaar]
t_{C}	=	Cyclustijd	[uur]
t_{GW}	=	Gereedschapswisseltijd	[uur]
t_{H}	=	Hoofdtijd	[uur]
t_{IN}	=	Inrichttijd	[uur]
t_{N}	=	Neventijd	[uur]
T	=	Standtijd van een gereedschap	[uur]
V_{MAT}	=	Brutowerkstukvolume	[m³]
V'_{AF}	=	Afvalpercentage	[%]
X	=	Seriegrootte van een fabricageserie	[-]
X_{EC}	=	Economische seriegrootte	[-]
Y	=	Seriegrootte van de totaalserie	[-]
Z	=	Geschatte aantal nettobedrijfs-uren/jaar	[uur/jaar]
ρ	=	Soortelijke massa	[kg/m³]

Oefenvragen

17.1 In figuur 1.6 is schematisch het verloop weergegeven van de gemaakte en de vastgelegde kosten in de opeenvolgende stadia van het voortbrengingsproces van een product. Verklaar het verloop van de lijnen in de grafiek. In bepaalde stadia zijn de verschillen tussen de gemaakte en de vastgelegde kosten relatief groot. Licht deze verschillen toe.
Geef aan welke rol de kosten voor informatieverwerking spelen tijdens het voortbrengingsproces.

17.2 Met een offertecalculatie wordt de verkoopprijs van een product vastgelegd. Voor de klant is deze verkoopprijs bindend. Licht toe welk nut het heeft om na de offertecalculatie een voor- en een nacalculatie uit te voeren, terwijl de door de klant te betalen prijs niet meer beïnvloed kan worden.

17.3 Hoe zijn de begrippen vaste kosten en variabele kosten gedefinieerd? Noem enkele voorbeelden van beide kostencategorieën.

17.4 Hoe zijn de begrippen directe en indirecte kosten gedefinieerd? Noem enkele voorbeelden van beide kostencategorieën.

17.5 Wat wordt er verstaan onder het begrip marginale kosten? Licht je antwoord kort toe.

17.6 Vergelijk de begrippen prijsbepaalde kostencalculatie en kostenbepaalde prijscalculatie met elkaar.

17.7 De productiekostprijs is afhankelijk van de gehanteerde machine-uurtarieven.
a Wat is in feite het belangrijkste uitgangspunt bij de bepaling van de productiekostprijs?
b Licht kort toe hoe een machine-uurtarief wordt bepaald.
c Wat is in feite de meest kritische factor bij de bepaling van het machine-uurtarief?
d Licht toe wat er gebeurt wanneer het machine-uurtarief onjuist bepaald is.

17.8 Omdat een bedrijf een gedeelte van haar producten in de toekomst wil gaan voorzien van poedercoating (zie paragraaf 10.4.5), zal het een make-or-buy-beslissing moeten nemen. Noem vijf voordelen en nadelen van uitbesteden.

17.9 In figuur 17.1 hebben we de bewerkingskosten uitgezet tegen de kwaliteitsklasse. Beantwoord de onderstaande vragen over deze figuur:
a Verklaar de betekenis van het begrip kwaliteitsklasse. Welke grootheid had hier ook langs de horizontale as kunnen staan? Motiveer je antwoord.
b In de figuur is een vrij groot gearceerd oppervlak aangegeven, waarbinnen de bewerkingskosten liggen. Verklaar waarom dit zo'n groot gebied is.
c Verklaar de trend van de bewerkingskosten die uit de figuur kan worden afgeleid.

17.10 Welke kosten moeten bij het lakken van plaatstalen kantoormeubilair in de kostprijsberekening worden meegenomen?

inclusief website!

Op www.industrieleproductie.nl vind je de antwoorden op deze vragen, maar ook extra studie- en oefenmateriaal, zoals video's en meer opgaven.

Index